



Уральский  
федеральный  
университет

имени первого Президента  
России Б.Н.Ельцина

Институт новых материалов  
и технологий

**В. Г. БУРДУКОВСКИЙ**

# ТЕХНОЛОГИЯ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ

Учебное пособие





Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

В. Г. Бурдуковский

# **ТЕХНОЛОГИЯ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ**

Учебное пособие

Рекомендовано методическим советом  
Уральского федерального университета  
для студентов вуза, обучающихся  
по направлению подготовки  
22.03.02 — Metallургия

Екатеринбург  
Издательство Уральского университета  
2019

УДК 621.98.04(075.8)

ББК 34.623.3я73

Б91

Рецензенты:

генеральный директор ООО «Совместное предприятие «Мишима — Маш-пром»» канд. техн. наук *А. А. Волнерук*;

завотделом обработки металлов давлением ОАО «Уральский институт металлов» канд. техн. наук *Г. П. Перунов*

Научный редактор доц., канд. техн. наук *Д. Л. Шварц*

На обложке использовано изображение с сайта <http://www.htmetalstampings.com>

**Бурдуковский, В. Г.**

Б91      Технология листовой штамповки : учебное пособие / В. Г. Бурдуковский. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2019. — 224 с.

ISBN 978-5-7996-2569-6

В пособии приведена технология холодной штамповки применительно к изготовлению деталей из листовой заготовки, дана классификация и технология процессов листовой штамповки. Изложены методы расчета основных параметров технологических процессов. Рассмотрены факторы, оказывающие влияние на точность и качество изготовления деталей. Пособие предназначено для бакалавров, обучающихся по направлению 22.03.02 — Металлургия, модуль «Технология кузнечно-штамповочного производства»; для слушателей ФПК, а также для программ дополнительной подготовки специалистов.

Библиогр.: 13 назв. Табл. 28. Рис. 63.

УДК 621.98.04(075.8)

ББК 34.623.3я73

ISBN 978-5-7996-2569-6

© Уральский федеральный  
университет, 2019



---

---

# Оглавление

Введение .....	5
1. Краткая история развития листовой штамповки .....	7
2. Общие положения и классификация процессов листовой штамповки .....	9
3. Краткая характеристика оборудования для листовой штамповки .....	12
4. Материалы для деталей, получаемых листовой штамповкой .....	20
4.1. Стальной листовой прокат .....	20
4.2. Листовой прокат из цветных и тугоплавких металлов и сплавов .....	30
4.3. Неметаллические материалы .....	34
5. Разделительные операции листовой штамповки .....	36
5.1. Разрезание листов на полосы и карты .....	36
5.2. Раскрой листового материала .....	38
5.2.1. Типы раскроя .....	38
5.2.2. Показатели эффективности раскроя .....	41
5.2.3. Выбор вида раскроя .....	42
5.2.4. Разрезка и отрезка листового проката .....	46
5.3. Вырубка и пробивка .....	59
5.3.1. Технологичность деталей .....	59
5.3.2. Сущность процессов вырубки и пробивки. Очаг деформации .....	63
5.3.3. Оптимальный зазор .....	66
5.3.4. Энергосиловые характеристики процесса вырубки и пробивки .....	69
5.3.5. Способы уменьшения деформирующего усилия .....	75
5.3.6. Точность и качество поверхности среза при вырубке и пробивке .....	77
5.3.7. Основные виды брака при вырубки и пробивке .....	81
5.3.8. Чистовая вырубка и пробивка .....	84
5.3.9. Зачистка в штампах .....	89

6. Формообразующие операции листовой штамповки .....	96
6.1. Классификация формоизменяющих операций .....	96
6.2. Штампуемость .....	97
6.3. Гибка .....	103
6.3.1. Сущность процессов гибки. Напряженно- деформированное состояние при гибке .....	103
6.3.2. Упругие деформации при гибке. Пружинение при свободной гибке .....	115
6.3.3. Деформирующее усилие при свободной гибке .....	120
6.3.4. Геометрические и кинематические параметры формообразующих элементов штампа при свободной гибке .....	122
6.3.5. Гибка в штампах .....	123
6.4. Вытяжка .....	157
6.4.1. Напряженно-деформированное состояние металла при вытяжке .....	161
6.4.2. Технологические расчеты .....	170
6.4.3. Вытяжка осесимметричных нецилиндрических деталей .....	185
6.4.4. Инструмент и зазоры .....	204
6.4.5. Вытяжка с утонением .....	205
6.5. Отбортовка .....	208
6.6. Формовка .....	211
7. Разработка технологии изготовления детали методом листовой штамповки .....	220
Библиографический список .....	222

---

---

## Введение

**Т**ехнология листовой штамповки — это научное описание совокупности методов, процессов и материалов, используемых для получения изделий из листовой заготовки методами обработки давлением. Технология как наука изучает сущность производственных процессов, взаимосвязь этих процессов и закономерности их развития. Задачей изучения технологии листовой штамповки является получение знаний, позволяющих вести расчеты технологических операций и процессов, проектировать соответствующий инструмент, управлять процессами изготовления изделий из листовой заготовки для получения качественных изделий, используя оптимальные технологические процессы, разрабатывать новые прогрессивные методы и процессы.

Термин «штамповка» означает изготовление изделий обработкой давлением с применением специального инструмента штампа. Штамповка — изменение формы и размеров тела путем пластической деформации материала в штампе. Существует два основных вида штамповки: объемная и листовая. Листовая штамповка является одной из основных разновидностей обработки металлов давлением.

Сущность способа заключается в процессе пластического формоизменения, где в качестве заготовки используются полученные прокаткой лист, полоса или лента, свернутая в рулон. Листовой штамповкой изготавливаются самые разнообразные плоские и пространственные детали массой от долей грамма и размерами, исчисляемыми долями миллиметра, и детали в десятки килограммов и несколько метров. Листовая штамповка широко используется в производстве летательных аппаратов, космической техники, судов, автомобилей, сельскохозяйственной техники, приборов, посуды и других деталей, где изготавливается большое количество тонкостенных деталей, которые выполнены из листового металла.

Для деталей, полученных листовой штамповкой, характерно то, что толщина их стенок незначительно отличается от толщины исход-

ной заготовки. Детали, полученные листовой штамповкой, обладают высокой прочностью и жесткостью при минимальной массе и отличаются соразмерностью. Удельная прочность, характерная для заготовок из проката, после листовой штамповки не понижается, а напротив, в результате применения к ним формоизменяющих операций и вследствие сопутствующего им упрочнения материала, повышается.

Листовая штамповка позволяет получать сложные по форме тонкостенные детали и массивные прочные детали, которые не могут быть получены иным способом. Листовая штамповка в сочетании со сваркой позволяет производить узлы практически неограниченных размеров. Детали, полученные листовой штамповкой, характеризуются высокой точностью изготовления и имеют высокое качество поверхности. Точность деталей оценивается 3–4-м классом, а чистота поверхности деталей — 6–8-м. Разнообразие методов штамповки, применение различных по конструкции штампов и использование соответствующих материалов для их изготовления обеспечивают рентабельное производство одних и тех же деталей при любом объеме выпуска.

Листовая штамповка — высокопроизводительный процесс, например, на прессах с усилием 1 МН, при работе с ручной подачей заготовок из ленты, часовая производительность составляет 600–800 деталей, а с механизированной подачей — 3000–4000 и более. Таким образом, стабильная точность штампуемых деталей, низкие издержки производства, сравнительно низкая стоимость инструмента, высокое качество поверхности изделий, сравнительная простота механизации и автоматизации процессов и перечисленные выше особенности листовой штамповки делают ее незаменимой при производстве многочисленных изделий из листа.

---

---

## 1. Краткая история развития листовой штамповки

**Л**истовая штамповка возникла много столетий назад как способ изготовления одинаковых по форме и размерам деталей домашней утвари, украшений и оружия.

Археологическими раскопками установлено, что кузнечная обработка в сочетании с термической обработкой была известна предкам славян, живших на территории Древней Руси еще в I тыс. до н. э. Давильные работы как элемент холодной листовой штамповки на приспособлениях типа гончарных кругов использовались в Грузии с середины II тыс. до н. э. Зарождение холодной обработки давлением можно отнести к бронзовому веку, когда придание нужной формы (заострение) бронзовых наконечников стрел и копий осуществлялось нанесением ударов молотком по литой заготовке.

Начало штамповки в России как ремесла относится к IX–X вв. Уже тогда в Киеве, Чернигове и других местах южной России такие изделия, как кольчуги, шлемы, мечи, клинки и другие предметы вооружения из железа и стали изготавливались методом штамповки. К тому же периоду относятся штамповка и чеканка цветных и благородных металлов в холодном и горячем виде для самых разнообразных целей. Особым искусством русских мастеров являлось изготовление посуды из тонких листов металла.

Листовая штамповка как производственный процесс зародилась на Тульских оружейных заводах в связи с необходимостью создания в массовом порядке различных видов вооружения для армии.

Технологическое и производственное совершенствование листовой штамповки получила с использованием кузнечно-штамповочных машин во второй половине XIX в. с развитием новых видов вооружений, судостроения, появлением автомобильного и железнодорожного транспорта и авиации. Это делало необходимым массовое производство разнообразных однотипных деталей, таких как гильз для снарядов, патронов, корпусных деталей, посуды и других изделий. Уже тогда

листовая штамповка обеспечивала значительное увеличение производительности, улучшение эксплуатационных показателей деталей.

В начале XX в. листовая штамповка сыграла исключительную роль в автомобилестроении (особенно в изготовлении) кузовов; в 30-е гг. — в авиастроении, судостроении и производстве бытовых машин; в 50-е гг. — в ракетостроении.

Основное развитие листовая штамповка в нашей стране получила в период пятилеток, во время и после Великой Отечественной войны. За годы пятилеток и в послевоенный период построены крупнейшие штамповочно-прессовые цехи листовой штамповки на первоклассных тракторных заводах-гигантах — Волгоградском, Харьковском, Челябинском, на автозаводах — Московском, Горьковском, Минском, Ярославском, Липецком, вагоностроительных заводах — Уралвагонзаводе и др. Эти цехи были укомплектованы современным по тому времени оборудованием, технологической оснасткой, средствами механизации и автоматизации. К этому времени были подготовлены квалифицированные кадры рабочих, инженерно-технических и научных работников по листовой штамповке, организованы центральные и отраслевые научно-исследовательские институты и свыше 40 профилирующих кафедр вузов, которые занимались исследованием и разработкой новых прогрессивных технологических процессов.

Значительный вклад в развитие теории и технологии листовой штамповки внесли С. И. Губкин, Л. А. Шофман, А. Д. Томленов, Е. А. Попов, А. Д. Матвеев, Е. И. Исаченков, А. Н. Малов, А. Ю. Аверкиев, В. П. Романовский, Е. Н. Мошнин, В. Т. Мещерин, М. Н. Лысов, С. П. Яковлев, М. Н. Горбунов и многие другие отечественные ученые и инженеры, а также зарубежные ученые Г. Закс, Э. Зибель, Х. Свифт, Э. Томсен, Ш. Кобаяши, В. Джонсон и др.

В настоящее время практически все заводы и предприятия, связанные с металлообработкой, используют в той или иной степени листовую штамповку. Широкое применение листовой штамповки обусловило создание специализированных машин-автоматов для штамповки. Технология и теория листовой штамповки продолжают развиваться и совершенствоваться. В последнее время возникли новые технологические процессы листовой штамповки: изотермическая и гидромеханическая штамповка, электроимпульсная штамповка, штамповка взрывом, штамповка магнитным полем и другие прогрессивные процессы получения изделий из листовой заготовки методами обработки металлов давлением.

---

## 2. Общие положения и классификация процессов листовой штамповки

**П**ри листовой штамповке исходная форма материала пластически изменяется. При этом обеспечиваются требуемые геометрическая точность формы, состояние и качество поверхности.

Формоизменение в большинстве случаев осуществляется с помощью основных инструментов — пуансона и матрицы и вспомогательных — прижима, съемника, выталкивателя и т. д.

Пуансон вдавливается в деформируемый материал, обтягивается, обтекается или охватывается им. Матрица вбирает в себя, охватывает изменяющий форму материал и пуансон.

Поверхность матрицы, по отношению к которой строится и измеряется проем, называется зеркалом матрицы. Зеркало матрицы может быть плоскими и искривленным.

Контуром проема матрицы называется линия пересечения поверхности полости с базовой поверхностью. Полость матрицы может быть глухой (с дном) или сквозной в виде отверстия. Если полость сквозная, матрица имеет форму осесимметричного или неосесимметричного кольца.

Пуансон и матрицу изготавливают, как правило, из более твердого и прочного материала, чем обрабатываемый материал. Вместе с тем один инструмент — пуансон или матрица — может быть из твердого материала, а другой — из эластичного, легко поддающегося формоизменению.

Инструмент называется жестким, если он изготовлен из более твердого материала, чем обрабатываемая заготовка.

Исходный материал, предназначенный для последующей обработки в виде тела определенной формы, называется заготовкой.

Различные фазы процесса изготовления детали, при которых происходит изменение формы заготовки, называются операциями.

Изготовление детали может быть произведено в результате проведения одной операции а в ряде случаев в результате выполнения нескольких операций. Такой процесс изготовления деталей называют многооперационным.

В зависимости от толщины листа (заготовки)  $s$  листовая штамповка условно делится на следующие группы:

- тонколистовую штамповку ( $s < 4$  мм);
- нормальную ( $s = 4...15$  мм);
- толстолистовую ( $s > 15...20$  мм).

Толстолистовая штамповка, как правило, производится с нагревом заготовки. С нагревом заготовки перед штамповкой производится также листовая штамповка ряда сплавов, которые обладают пониженной деформируемостью, таких, например, как некоторые титановые сплавы.

Все процессы листовой штамповки могут быть разбиты на следующие основные группы операций:

- разделительные;
- формоизменяющие;
- прессовочные;
- комбинированные;
- штампосборочные.

При разделительных операциях материал заготовки доводится до разрушения, а при формоизменяющих операциях изменяется форма и размеры заготовок, при этом деформирование заготовки не должно сопровождаться разрушением.

Кроме так называемых классических способов штамповки, в которых штамповочные операции производятся жестким, как правило, твердым металлическим инструментом, существуют способы листовой штамповки с помощью различных сред и полей. Такими способами являются:

- электрогидравлическая штамповка, которая основана на использовании ударной волны, получаемой в результате электрического разряда в жидкости;
- штамповка взрывом — основана на использовании энергии взрывной волны, передаваемой на деформируемую заготовку через воздух или жидкость;
- магнитно-импульсная штамповка — с использованием сил электромагнитного взаимодействия между вихревыми токами,



наведенными в стенке обрабатываемой заготовки при пересечении их силовыми линиями магнитного поля и самим импульсным полем, в результате чего возникают импульсные механические силы, деформирующие заготовку.

Эти способы листовой штамповки возникли в связи с интенсивным развитием судостроения, авиационной и ракетной техники, энергетического и химического машиностроения, что тесно связано с обработкой труднодеформируемых высокопрочных и жаропрочных металлов и сплавов, а также с постоянно увеличивающимися размерами вновь проектируемых деталей машин и ракет.

### 3. Краткая характеристика оборудования для листовой штамповки

Оборудование для листовой штамповки можно условно разделить на две группы: основное и вспомогательное (рис. 3.1). Основным называется оборудование, на котором изготавливаются детали (изделия). Вспомогательное оборудование служит для подготовки листового материала к штамповке, перемещения его через рабочую зону и переработки отходов [1, 2].



Рис. 3.1. Классификация оборудования для листовой штамповки

Кривошипные прессы — наиболее распространенный вид машин для листовой штамповки, в которых кривошипно-шатунный механизм приводит в возвратно-поступательное движение ползун с верхней половиной штампа. Термин «кривошипный» определяет обобщенную конструкцию главного вала, которая может быть выполнена в виде эксцентрикового, коленчатого или кривошипного вала. Ос-

новные параметры характеристики кривошипного пресса:  $P_H$  — номинальное усилие, Н;  $S$  — длина хода ползуна, мм;  $n$  — число ходов ползуна в минуту;  $h$  — межштамповое пространство, мм;  $b + l$  — размеры стола в плане, мм.

Под номинальным усилием пресса  $P_H$  понимается усилие, которое может развить пресс без ущерба для прочности основных звеньев на угле поворота кривошипа равном  $5-30^\circ$ .

Длина хода ползуна пресса — путь, проходимый ползуном при повороте кривошипа на  $180^\circ$ .

Число ходов ползуна в минуту — это число его двойных ходов, которое определяется частотой вращения кривошипа.

Межштамповое пространство — это расстояние между горизонтальными плоскостями стола и ползуна при нижнем его положении. Его можно регулировать в зависимости от высоты штампов.

Размеры стола и плоскости ползуна замеряются справа налево по фронту и спереди назад и служат для определения размеров штампов в плане, которые могут быть установлены на этом прессе.

Для мелких и средних деталей в основном применяют прессы простого действия, которые имеют один ползун и предназначены для несложных операций, таких как вырубка, неглубокая вытяжка, гибка и т. д. Прессы двойного действия имеют наружный и внутренний ползуны. Эти прессы применяют для изготовления деталей глубокой вытяжкой. В зависимости от размеров штампуемых деталей прессы простого и двойного действия подразделяются на одно-, двух- и четырехкривошипные.

Четырехкривошипные прессы предназначены для изготовления крупногабаритных изделий глубокой вытяжкой и вырубкой по контуру сложной конфигурации.

Прессы однокривошипные простого действия изготавливают с ненаклоняемыми и наклоняемыми станинами. По своей конструкции станины этих прессов могут быть открытыми (С-образные) и закрытыми.

Прессы однокривошипные простого действия ненаклоняемые серийно изготавливаются с усилиями  $25-2500$  кН и числом ходов ползуна пресса в минуту  $50-400$ . Главный вал прессов кривошипный, расположен перпендикулярно фронту пресса. Прессы этого типа могут быть изготовлены с передвижным или откидным столом, что позволяет применять штампы различной высоты, или с рогом — для обработки деталей с замкнутым контуром. Эти модели прессов могут ос-

нашаться всеми видами подач как для полосы, так и для ленты и могут работать с промышленными роботами.

Однокривошипные открытые наклоняемые прессы простого действия выпускаются усилием 63–1600 кН и числом ходов ползуна в минуту 45–250. Главный вал этих прессов, в основном эксцентриковый или кривошипный, расположен параллельно фронту. Наклон станины дает возможность облегчить удаление готовых изделий и отходов путем их скатывания по наклонной плоскости.

Прессы однокривошипные простого действия с закрытой станиной изготавливаются с номинальным усилием 1600 кН — 40 МН и числом ходов ползуна пресса в минуту 6–40. Эти прессы могут работать с автоматическими подачами, съемниками и промышленными роботами.

Для крупногабаритных листовых деталей применяются двух- и четырехкривошипные прессы простого действия со станинами открытого и закрытого типов.

Двухкривошипные прессы со станинами открытого типа изготавливают с номинальным усилием 1000–250 кН, а со станинами закрытого типа — до 8000 кН. Четырехкривошипные прессы выполняют только со станинами закрытого типа; они имеют номинальное усилие 5–63 МН; главный исполнительный механизм эксцентрикового типа с плунжерной подвеской ползуна.

Прессы двойного действия предназначены для изготовления изделий из листового материала методом глубокой вытяжки. Они могут быть однокривошипными с номинальным усилием 630–6300 кН, двухкривошипными с усилием 5 и 8 МН и четырехкривошипными с усилием 6, 3 и 10 МН. Эти прессы используются с загрузчиками штучных заготовок и механической рукой для съема деталей.

Главный исполнительный механизм — эксцентриковый вал, шатун и внутренний ползун. Основным элементом, преобразующим вращательное движение коленчатого (эксцентрикового) вала в поступательное движение ползуна, является шатун. Дополнительный исполнительный механизм — кривошип, рычажно-ползунный механизм, плунжеры и наружный ползун.

Для листовой штамповки применяются и прессы тройного действия. Они имеют дополнительный третий (нижний) ползун, который при работе осуществляет вытяжку в направлении обратном вытяжке верхнего внутреннего ползуна. Такие прессы получили распространение в прессово-кузовных цехах на технологических операциях, проводя-

щих вытяжку за один ход таких сложных по форме крупногабаритных изделий, как крыши кузовов легковых автомобилей с вытянутыми в обратном к основной вытяжке направлении проемами переднего и заднего окон. Применение прессов тройного действия способствует сокращению числа операций штамповки, улучшению качества изделий, уменьшению числа основного прессового оборудования в цехе.

У прессов тройного действия коленно-рычажная подвеска выполняется не только у наружного, но и у внутреннего верхнего ползуна, что позволяет ему останавливаться во время движения нижнего ползуна. Эти прессы могут быть изготовлены как с общим, так и с независимым приводом нижнего ползуна. Прессы тройного действия, так же как и мощные прессы других типов, изготавливают с нижним приводом для всех ползунов, что значительно уменьшает их высоту над уровнем пола.

Механические прессы усилием выше 1,6 кН, листогибочные кривошипные прессы и ножницы оборудуют уравнивателями, которые предотвращают опускание ползуна с прикрепленным на нем инструментом под действием общей массы при отказах тормоза или поломке шатуна.

Гидравлические прессы предназначены в основном для глубокой вытяжки. Прессы простого действия используются для вытяжки деталей из тонкого листа в холодном состоянии, а прессы двойного действия предназначены для изготовления крупногабаритных изделий из толстолистного металла глубокой вытяжкой.

В основе действия гидравлического пресса лежит закон Паскаля, согласно которому внешнее давление на жидкость передается равномерно во все стороны замкнутой системы. Основные характеристики гидравлических прессов — номинальное усилие  $P_n$ , равное произведению давления жидкости  $p$  в рабочем цилиндре пресса на площадь (или сумму площадей) плунжера  $F$  ( $P_n = pF$ ), и величина хода плунжера  $H$ .

Вся гидропрессовая установка состоит из пресса, привода, органов управления и трубопроводов.

Приводом гидравлических прессов является система, обеспечивающая повышение давления жидкости и ее аккумулярование. Наиболее распространенный привод листоштамповочных прессов из-за своих небольших размеров — насосный, в нем жидкость подается насосом и затем поступает в полость рабочего цилиндра пресса. Давление жидкости принимается 20, 32 и 45 МПа. Коэффициент полезного действия насосного привода  $\eta = 0,6...0,8$ .

Для мощных прессов или для группы прессов применяют насосно-аккумуляторный привод. Он отличается от насосного привода тем, что в него входит аккумулятор — емкость для накопления жидкости высокого давления. По мере работы пресса жидкость из аккумуляторов периодически расходуется, а при остановках — накапливается. Насосно-аккумуляторный привод благодаря большому объему жидкости обеспечивает высокую скорость движения инструмента и необходимое усилие прессования. Давление в аккумуляторе поддерживается давлением воздуха, которое создается компрессором.

Детали из листовых материалов, изготавливаемые на гидравлических прессах, обычно имеют большие размеры. В связи с этим и основной инструмент прессов — штампы также имеют большие габариты. Поэтому основной отличительной чертой листоштамповочных прессов является большое в плане штамповочное пространство.

По технологическому назначению гидравлические presses могут быть простого, двойного и тройного действия и развивать усилие в пределах 0,5–40 МН.

Прессы простого действия имеют один ползун и предназначены для простых штамповочных операций и неглубоких вытяжек. К этому типу прессов относятся и presses для штамповки эластичной средой — резиной или полиуретаном. Эти presses имеют усилия 20–600 МН и применяются для обработки листа толщиной 1,5–2 мм из алюминиевых сплавов и 0,5–0,6 мм из стального листа.

Прессы двойного действия предназначены в основном для выполнения операций глубокой вытяжки. Они снабжены индивидуальным масляным приводом от насосов переменной производительности, что позволяет наилучшим образом использовать установленную мощность электродвигателей. Характерной особенностью прессов этого типа является то, что внутри наружного прижимного ползуна по направляющим перемещается внутренний ползун. Конструкция ползунов предусматривает их взаимное скрепление для работы в режиме простого действия. Прессы этого типа имеют также гидравлическую подушку, встроенную в стол пресса. Подушка обеспечивает нижний прижим изделия и его выталкивание. Наличие нижней гидравлической подушки позволяет устанавливать на пресс штампы для изготовления деталей, требующих эффекта тройного действия.

Основные детали прессов — рабочие цилиндры. Они могут быть плунжерного и поршневого типа. Цилиндры плунжерного типа — цилиндры

простого действия, то есть плунжер и траверса перемещаются только в одну сторону; чтобы они вернулись в исходное положение, на траверсу действуют возвратные цилиндры. Цилиндры поршневого типа наиболее часто применяются в прессах простого действия наибольшей мощности, они называются цилиндрами двойного действия. Рабочий ход осуществляется при подаче масла сверху поршня, а обратный ход — снизу.

Основные пути увеличения номинального усилия пресса — это увеличение диаметра плунжера рабочего цилиндра или увеличение числа рабочих цилиндров пресса. В настоящее время листоштамповочные прессы изготовляют одно-, двух-, трех- и многоцилиндровыми.

Станины гидравлических листоштамповочных прессов могут быть одностоечными, двухстоечными и колонного типа. Листы станины изготовляют из стали 35Л, а сварные — из стали Ст3. В качестве материала для изготовления колонн применяют вязкую углеродистую сталь с содержанием углерода 0,3–0,45 %, то есть сталь 30, 45.

Листоштамповочные молоты также применяются для штамповки, но значительно реже, чем кривошипные и гидравлические.

Многопозиционные листоштамповочные автоматы — наиболее производительное оборудование, широко распространенное в промышленности. На них осуществляется многооперационная штамповка изделий из полосы и ленты, возможна и работа со штучными заготовками. Перенос заготовок по позициям осуществляется с помощью различных типов подач. Многопозиционные листоштамповочные пресс-автоматы относятся к машинам, в которых несколько заготовок периодически перемещаются с одной позиции штамповки на другую. Штамповка происходит одновременно на всех позициях в соответствующем штампе.

Современные многопозиционные автоматы обычно изготовляют со станинами закрытого типа, двухстоечными, оснащают фрикционными пневматическими муфтами включения. Число позиций (штампов) может быть 6–24. Автоматы изготовляются с верхним и нижним расположением привода.

Многопозиционные автоматы с нижним приводом имеют конструктивные преимущества перед автоматами с верхним приводом. Стойки и траверсы в них несут меньшую нагрузку, что позволяет делать их более легкими; применение длинных шатунов снижает нагрузку на направляющие шатуна, в результате чего уменьшается их износ и, как следствие, повышается срок службы инструмента. Низкое располо-

жение центра тяжести делает машину более устойчивой. Автоматы с нижним расположением привода обычно имеют высокое число ходов в минуту, они широко применяются на заводах радиотехнического и электротехнического профиля.

Характерные особенности таких автоматов — незначительная вибрация в процессе работы, малые перекосы верхних частей штампа относительно нижних, что обеспечивает высокую стойкость рабочих частей штампа и, следовательно, высокое качество продукции. Листоштамповочные пресс-автоматы с нижним приводом в основном применяют для изготовления деталей вырубкой и гибкой с неглубокой вытяжкой.

Листоштамповочные автоматы с нижним приводом изготавливают в диапазоне усилий 25–2500 кН. В автоматах используется металлическая лента толщиной 1–4 мм. Ход траверсы у прессов с нижним приводом составляет 8–80 мм; число ходов траверсы в минуту 400–1000 и 32–160.

Листоштамповочные автоматы с верхним приводом изготавливают с номинальным усилием 160 кН — 40 МН. Ход ползуна у автоматов соответственно 100 и 500 мм; число ходов ползуна пресса в минуту 35–120 и 10–16.

Станины прессов усилием до 1000 кН выполняют цельносварными из стального листа. Станины автоматов с большим усилием делают составными: из стола, стоек, траверсы — и стягивают их стальными болтами.

Для штамповки деталей из штучных заготовок и для вырубки заготовок в некоторых конструкциях многопозиционных автоматов предусматриваются боковые ползуны.

Многопозиционный листоштамповочный автомат часто оснащают механизмами, которые обеспечивают штамповку деталей из ленты, из отдельных полос и из штучных заготовок. Такими механизмами являются механизм валковой подачи для двухрядной и трехрядной вырубки, механизм подачи штучных заготовок; механизм подачи полосы путем продольного перемещения рейферных ленток, поперечного перемещения рейферных ленток, прижимные и выталкивающие устройства, механизмы смотки и размотки, пуансонодержатели и др.

Привод автоматов обычно осуществляется от электродвигателя через клиноременную передачу и маховик, установленный на валу.

Взаимодействие механизмов многопозиционного пресса осуществляется в соответствии с так называемой цикловой диаграммой.



Грейфер обеспечивает достаточно точную подачу. Часто на грейферных захватах устанавливают электроконтактные датчики, которые следят за прохождением деталей и, при застревании их в верхней или нижней частях штампа, подают сигнал и останавливают автомат.

Современные многопозиционные листоштамповочные автоматы оснащаются механическими тензометрами, которые позволяют вести наблюдение за изменением усилия во время наладки и штамповки. При перегрузке автомата эти приборы подают сигнал и останавливают автомат.

Использование листоштамповочных многопозиционных автоматов имеет преимущества по сравнению со штамповкой на обычных прессах: уменьшается число единиц прессового оборудования, отсутствуют склады для хранения межоперационных заделов, уменьшаются затраты на транспортирование полуфабрикатов между прессами, уменьшается число ремонтируемого оборудования. Вследствие этого сокращается число обслуживающего персонала, освобождаются значительные производственные мощности. Все это приводит к сокращению цикла производства, снижению расхода электроэнергии, уменьшению износа оборудования. По сравнению с однопозиционными прессами в несколько раз увеличивается производительность штамповки, повышается качество продукции, улучшаются условия и безопасность работы.

Применение многопозиционных автоматов обеспечивает ряд эксплуатационных преимуществ по сравнению с другими видами оборудования: снижение стоимости штамповой оснастки, упрощение ремонта штампов, уменьшение затрат времени на отладку и доводку оснастки.

Широкое использование свойств листового металла при высоких скоростях деформации производится на машинах импульсного действия: гидравлических, газовых, магнитных, с помощью энергии взрыва.

В современной листовой штамповке широко применяются машины со средствами механизации и автоматизации, автоматические линии и комплексы, оснащенные компьютерами и управляющими электронно-вычислительными машинами.

К вспомогательному оборудованию относятся кривошипные и гидравлические ножницы с наклонным ножом для разрезки заготовок и дисковые ножницы для продольной резки рулона на ленты, зигмашины, правильные машины, разматывающие и наматывающие устройства, пакетирувочные и брикетировочные прессы.

---

## 4. Материалы для деталей, получаемых листовой штамповкой

**Л**истовой штамповкой изготавливают изделия из металлических и неметаллических материалов [3].

Эксплуатационные свойства готовых деталей, полученных штамповкой, в значительной степени определяются характеристиками исходной листовой заготовки, полученной прокаткой. При выборе характеристик листовой заготовки традиционно руководствуются требованиями к свойствам детали и способностью заготовки к формоизменению в операциях листовой штамповки. Однако для обеспечения высокого качества изделий нужно непрерывное улучшение эксплуатационных свойств деталей. Это требует не только учитывать весь комплекс физико-механических свойств материала, но и их направленность.

Направленность свойств определяет величину и характер анизотропии деформационных свойств листового проката и эксплуатационные свойства штампованных деталей в определенных направлениях, то есть стабильность показателей качества изделий, особенно эксплуатационных, может быть достигнута путем непрерывного формирования свойств в многосвязных технологических средах их изготовления. В процессе передачи свойств важную роль играет наследственная информация, носителем которой является материал, его кристаллическая и зеренная структура.

### 4.1. Стальной листовой прокат

В большинстве случаев для холодной штамповки применяются низкоуглеродистые стали высокой пластичности и свариваемости с содержанием углерода 0,05–0,4 %. По качественным показателям конструкционная углеродистая сталь подразделяется на сталь обычного качества и сталь качественную. В современном листоштамповочном

производстве широко используется ряд листовых сталей различных марок и методов их получения. К наиболее распространенным относятся:

- сталь углеродистая обыкновенного качества;
- сталь тонколистовая холоднокатаная низкоуглеродистая конструкционная качественная;
- сталь толстолистовая горячекатаная конструкционная качественная;
- сталь повышенной прочности;
- сталь тонколистовая конструкционная легированная высококачественная специального назначения.

Наиболее широко применяют листовой и сортовой прокат. В качестве неметаллических материалов используют слоистые и волокнистые пластики и пластмассы гомогенной структуры. Объем выпуска штампованных деталей из пластмасс непрерывно возрастает.

Основные виды листовой стали, применяемые для листовой штамповки, представлены в табл. 4.1 [4].

Таблица 4.1

**Основные виды листовой стали, применяемые для листовой штамповки**  
( $s$  — толщина листа)

Сталь (прокат)	ГОСТ		Марка стали
	Технические условия	Химический состав	
Углеродистая сталь обыкновенного качества, $s = 0,5...4,0$ мм	380—71	380—71	Ст0 — Ст6
Листовая углеродистая качественная и обыкновенного качества общего назначения, $s = 0,2...3,9$ мм	16523—70	1050—74 380—71	05кп — 50 Ст0 — Ст5
Прокат тонколистовой из конструкционной низколегированной стали, $s = 0,5...3,9$ мм	17066—80	1928—79	14Г2, 09Г2 12ГС, 16ГС 15ГФ, 14ХГС и др.
Прокат тонколистовой холоднокатаный из низкоуглеродистой качественной стали для холодной штамповки, $s = 0,5...3,0$ мм	9045—80	9045—80	08Ю, 08пс, 08кп
Листовая легированная конструкционная общего назначения, $s = 0,5...3,9$ мм	1542—71	1050—88 4543—71	60Г, 20Х, 10Г2, 25ХГСА и др.
Тонколистовая коррозионно-стойкая жаростойкая и жаропрочная, $s = 0,7...3,9$ мм	5582—82	5632—72	08Х13, 12Х13, 12Х17, 12Х18Н9Т и др.

Листовой прокат выпускается в виде листов, ленты и рулонов. В зависимости от способа производства, он подразделяется на горячекатаный и холоднокатаный. Холоднокатаный прокат (толщина его не превышает 4 мм) по сравнению с горячекатаным имеет меньшую шероховатость поверхности, разнотолщинность и более высокие технологические свойства. Он широко применяется для изготовления холодноштампованных деталей. Из горячекатаного проката методами листовой штамповки изготавливают преимущественно различные неглубокие и плоские детали. Прокат изготавливают в термически обработанном и дрессированном состоянии.

Характеристики листового проката регламентируются стандартами на технические условия, химический состав и сортамент. Листовой прокат подразделяют: по способу производства; по видам продукции; по качеству отделки на группы. Так прокат листовой холоднокатаный конструкционный подразделяется: на листы холоднокатаные общего назначения, изготавливаемые по ГОСТ 16523–97; сортамент соответствует ГОСТ 19904–74; химический состав стали должен соответствовать ГОСТ 1050–88. По нормируемым характеристикам прокат подразделяется на 5 категорий, по качеству отделки поверхности делится на группы I, II, III, по способности к вытяжке (толщиной до 2 мм): Г — глубокой и Н — нормальной.

Тонколистовой холоднокатаный прокат из малоуглеродистой качественной стали толщиной 0,5–3 мм, изготавливаемый в рулонах, предназначенный для холодной штамповки согласно ГОСТ 9045–80 подразделяют:

- по способности к вытяжке на четыре категории —
  - 1) весьма особо сложная вытяжка — ВОСВ;
  - 2) особо сложная вытяжка — ОСВ;
  - 3) сложная вытяжка — СВ;
  - 4) весьма глубокая вытяжка — ВГ;
- по качеству отделки поверхности на три группы —
  - 1) особо высокой отделки — I;
  - 2) высокой отделки — II;
  - 3) повышенной отделки — III;
- по состоянию поверхности —
  - 1) глянцевая — гл;
  - 2) матовая — м;
  - 3) повышенной отделки — III;

- по точности прокатки —
  - 1) повышенной точности — П;
  - 2) обычной точности — О.

Пример условного обозначения:

*Лист стали 08Ю толщиной 1,0 мм, шириной 1000 мм, длиной 2000 мм, повышенной точности, особо высокой отделки поверхности, матовая поверхность, особо сложной вытяжки:*

*Лист П — 1,0×1000×2000 ГОСТ 19904—74*

*1 — м — ОСВ — 08Ю ГОСТ 9045—80*

ГОСТы на химический состав определяют необходимую массовую долю элементов в сплаве и предельные отклонения в процентах. Так согласно ГОСТ 9045—80 химический состав тонколистовой холоднокатаной низкоуглеродистой качественной стали (повышенной штампуемости) должен быть следующим (табл. 4.2).

Таблица 4.2

**Химический состав тонколистовой холоднокатаной низкоуглеродистой качественной стали (повышенной штампуемости)**

Марка стали	Массовая доля элементов, %, не более							Cu
	Mn	C	S	P	Si	Cr	Ni	
08Ю	0,2—0,35	0,07	0,025	0,02	0,01	0,03	0,06	0,06
08ПС	0,2—0,45	0,09	0,03	0,025	0,04	—	0,10	0,15
08кп	0,2—0,4	0,1	0,03	0,025	0,03	—	0,10	0,15
08Фкп	0,2—0,4	0,08	0,025	0,02	0,01—0,03	0,03—0,04	0,10	0,10

Механические свойства тонколистовой холоднокатаной низкоуглеродистой качественной стали представлены в табл. 4.3, листовых низкоуглеродистых и среднеуглеродистых качественных сталей приведены в табл. 4.4. Для сталей, представленных в табл. 4.3, большое значение имеет их микроструктура, величина балла зерна феррита и структурно-свободного цементита, что нашло отражение в ГОСТ 9045—80 (табл. 4.5).

В настоящее время широкое распространение среди листовой штамповки толстостенных изделий (с толщиной стенки 4—14 мм) нашел листовой горячекатаный прокат из конструкционной качественной стали (ГОСТ 4041—870). Листовой прокат бывает четырех категорий в зависимости от нормируемых характеристик (механические свойства, величина зерна, структурно-свободный цементит, полосчатость и величина обезуглероженного слоя для сталей марок 35, 40).

Таблица 4.3

**Механические свойства тонколистовой холоднокатаной  
низкоуглеродистой качественной стали**

Категория вытяжки	Сталь	$\sigma_T$	$\sigma_B$	$\delta$ , % при толщине листа, мм, не менее		Твердость HRB, не более
		МПа, не более		0,4–1,5	1,5–2,0	
ВОСВ	08Ю	185	250–320	40	42	46
ОСВ	08Ю	195	250–350	36	40	46
СВ	08Ю	205	250–350	34	38	48
ВГ	08кп	210	260–360	28	29	—
ВГ	08пс	210	260–360	28	29	—

Таблица 4.4

**Микроструктура стали (ГОСТ 9045–80)**

Категория вытяжки	Балл зерна феррита	Структурно-свободный цементит в баллах, не более
ВГ СВ	6–9	3
ОСВ ВОСВ	6–9	2

Таблица 4.5

**Механические свойства листовых низкоуглеродистых  
и среднеуглеродистых качественных сталей**

Марка стали	Временное сопротив. $\sigma_B$ , МПа	Предел текучести $\sigma_T$ , МПа	Относит. удлине- ние $\delta$ , %	Относит. сужение $\psi$ , %	Сопро- тив. срезу $\sigma_{ср}$ , МПа	Твер- дость без термооб. НВ
05кп	314	186	34	78	235	128
08кп, 08пс	324	196	33	76	245–254	131
10кп, 10пс	321	206	31	72	264	143
15кп, 15пс	373	225	27	68	314	149
20кп, 20пс	412	245	27	66	323	163
25	451	274	23	58	382	170
30	490	294	21	52	403	179
35	529	314	20	52	435	187
40	568	321	19	—	467	197
45	591	353	16	50	486	207
50	627	373	14	—	515	217

Углеродистые стали обладают рядом недостатков: небольшой прокаливаемостью (до 12 мм), высокой критической скоростью закали, которая требует закали в воде, что приводит зачастую к значительному короблению деталей; низкими температурами отпуска во избежание падения прочности, что приводит к высокому уровню остаточных напряжений. Кроме того, углеродистые стали не обладают рядом необходимых для некоторых видов эксплуатации свойств. Поэтому стали дополнительно легируют.

Стали, в которые для получения требуемых свойств специально вводят легирующие элементы, называются легированными. Влияние легирующих элементов на механические свойства стали зависит от ее структурного состояния, которое определяется термообработкой.

Легированные стали классифицируются по четырем признакам: по равновесной структуре, структуре после охлаждения, составу и назначению. Для холодной штамповки используют легированные стали повышенной пластичности с особыми свойствами (жаропрочность, коррозионная устойчивость и т. п.).

В России выпускаются низколегированные холоднокатаные стали повышенной прочности. Среди них широко применяются для изготовления деталей методами листовой штамповки холоднокатаные многофазные стали, в частности холоднокатаные двухфазные стали 08ГСЮТ, 08ГСЮФ, 10ЮА, 18ЮТ с ферритно-мартенситной структурой, которая содержит до 20–25 % твердой фазы мартенсита в пластической ферритной матрице. Такие стали имеют значительное преимущество перед сталями перлитного класса. Повышенная прочность таких сталей обеспечивается легированием марганцем (до 16 %) и кремнием (до 0,7 %) в сочетании с термической обработкой в агрегатах непрерывного отжига. Двухфазные стали имеют низкое отношение предела текучести к временному сопротивлению ( $\sigma_T/\sigma_B = 0,6...0,65$ ), высокий показатель деформационного упрочнения  $n$  и нормальной анизотропии  $R^*$  ( $n = 0,21...0,25$  и  $R^* = 1,1...1,6$ ) и обладают широким диапазоном изменения временного сопротивления ( $\sigma_B = 400...550$  МПа). У этих сталей на диаграмме растяжения отсутствует площадка текучести. Они мало подвержены деформационному старению, что имеет значение при длительном хранении их на складе или в цехе.

Указанные свойства свидетельствуют об их хорошей штампуемости и пригодности для изготовления деталей сложной формы. Ценным свойством этих сталей является также повышение их прочности

при штамповке. Эти стали в основном применяются в автомобилестроении и других отраслях машиностроения.

Холоднокатаные многофазные стали выпускаются толщиной 0,7–30 мм и поставляются по ТУ 14-15-140–84 и ТУ 14-4-1333–85 в виде листов рулонов и лент.

Многофазные стали имеют более высокое отношение предела текучести к временному сопротивлению и используются в условиях, требующих высокого качества формовки в холодном состоянии, высокой прочности, хорошей коррозионной стойкости и легкости конструкций.

Вполне удовлетворительную штампуемость в отожженном состоянии имеют хромистые и хромоникелевые коррозионно-стойкие легированные стали. Они обладают высоким относительным удлинением и благоприятным для штамповки отношением предела текучести к временному сопротивлению  $\sigma_T/\sigma_B$ . Так,  $\sigma_B = 550$  МПа,  $\sigma_T = 200$  МПа и  $\delta = 40\%$  для стали 12Х18Н9Т. Отличительная особенность этих сталей от низкоуглеродистых — высокое сопротивление деформированию и интенсивное упрочнение в процессе холодной штамповки.

Для отдельных отраслей промышленности изготавливают стальной листовой прокат специального назначения, в частности, сталь тонколистовую конструкционную легированную высококачественную специального назначения. Эти стали обладают повышенной прочностью при умеренной вязкости и пластичности. Стали марок 25ХГСА и 30ХГСА используются для нагруженных деталей взамен хромоникелевых и хромомолибденовых сталей. Стали марок 30ХГСН2А, 12Х2НВФА, 23Х2НВФА относятся к группе сталей повышенной прочности, вязкости и прокаливаемости. Эти стали применяются для эксплуатации деталей при низких температурах (–30...–80 °С).

Сталь изготавливают горячекатаной и холоднокатаной, прокатывают в листы толщиной до 3,9 мм и применяют в термически обработанном состоянии: умягченном или нормализованном. Сортамент горячекатаных листов регламентируется ГОСТ 19903–74, а холоднокатаных повышенной и нормальной точности — ГОСТ 19904–90. Нормируемые показатели механических и технологических свойств должны соответствовать ГОСТ 11268–78. Механические свойства этих сталей после термообработки представлены в табл. 4.6.



Таблица 4.6

**Механические свойства тонколистовых конструкционных легированных  
высококачественных сталей специального назначения (ГОСТ 11268–78)**

Сталь	Термическая обработка	$\sigma_B$ , МПа	$\delta_s$ , % после закалки и отпуска	$\delta_s$ , % после нормализации
25ХГСА	З, 880, м + Ов, 470–550, в или м	1080	10	21
30ХГСА	З, 880, м + Ов, 480–570, м	1080	10	20
30ХГСН2А	З, 900, м + Ос, 200–300, в	1570	9	19
12Х2НВФА	З, 910, м + Ос, 490–550, в	1030	10	15
23Х2НВФА	З, 890, м + Ов, 590–620, в или м	1130	9	17

*Примечание.* Условные обозначения термообработки в таблице: З — закалка, О — отпуск; среда охлаждения: в — воздух, м — масло, цифры — температура, °С.

К стальному листовому прокату специального назначения относят: листовой прокат из низкоуглеродистой отожженной и протравленной (декапированной) стали для производства эмалированной посуды (ГОСТ 24244–80); прокат из тонкой отожженной углеродистой стали; жечь черную (ГОСТ 13345–85) для изготовления цельноштампованной и сборной тары и другие.

Концепция современного автомобиля предлагает существенный рост безопасности при приемлемом уровне затрат на его производство. Реализация этой концепции требует применения высокопрочных коррозионно-стойких сталей. Наряду с высокой прочностью, автомобильный лист, из которого изготавливают методами штамповки кузовные и другие детали, должен обладать хорошей штампуемостью, зависящей от пластических свойств применяемой стали.

В последнее десятилетие ведущие производители автомобильных сталей в Японии, США, Швеции, Корее, Германии, России и ряда других стран разработали и освоили производство новых марок стали, обладающих улучшенными потребительскими свойствами [3]. Особую перспективную группу среди них представляют стали класса Interstitial Free Steel, так называемые IF-стали. В этих сталях нет растворенных атомов, растягивающих решетку твердого железа. IF-сталь имеет свободную от атомов внедрения объемноцентрированную кубическую решетку феррита. В этих сталях ультранизкое содержание углерода, которое достигнуто удалением монооксида углерода, водорода, азота и других газов в процессе производства стали с помо-

щью вакуумной дегазации. IF-стали — это мягкие стали, очень пластичные, они не стареют и не образуют линий скольжения при формоизменении.

В настоящее время характеристики листового проката из этих сталей регламентируются международными стандартами EN 10130: 2006 «Холоднокатаный плоский прокат из мягких сталей для холодного деформирования» и EN10131: 2006 «Холоднокатаный плоский прокат из низкоуглеродистой стали высокой прочности без покрытия и с цинковым или цинково-никелевым покрытием для холодного деформирования».

Эти стали имеют гарантированные предел текучести и предел прочности, высокую пластичность, низкий разброс механических свойств, не подвержены старению и, как следствие, имеют высокую способность к формоизменению, что позволяет использовать их для всех видов листовой штамповки, включая штамповку деталей сложной формы и глубокую вытяжку. В табл. 4.7 и 4.8 приведены химический состав и механические свойства холоднокатаных формующих сталей.

Кроме листов и рулонов сталь выпускают в виде горячекатаной и холоднокатаной ленты. Лента горячекатаная (ГОСТ 1530–78) имеет толщину 2–8 мм, ширину 100–600 мм, изготавливается из сталей 08–60 по ГОСТ 1050–74, 08Ю по ГОСТ 9045–80 и др. Лента холоднокатаная из низкоуглеродистой стали (ГОСТ 503–81) имеет толщину 0,05–4,0 мм, ширину 4–450 мм, изготавливается из сталей 08кп, 08пс, 10кп, 10 по ГОСТ 16523–70.

Таблица 4.7

**Химический состав холоднокатаных формующих сталей**

Марка стали	Название	Массовая доля элементов, %						
		C	Mn	P	S	Si	Al	Ti
DC01	Мягкая сталь	≤0,120	≤0,60	≤0,045	≤0,045	—	—	—
DC03		≤0,100	≤0,145	≤0,035	≤0,035	—	—	—
DC04		≤0,080	≤0,040	≤0,030	≤0,030	—	—	—
DC05	IF-сталь	≤0,060	≤0,035	≤0,025	≤0,025	—	—	—
DC06		≤0,020	≤0,025	≤0,020	≤0,020	—	—	—
DC07		≤0,010	≤0,020	≤0,020	≤0,020	—	—	—

Таблица 4.8

## Механические свойства холоднокатаных формующих сталей

Мар- ка ста- ли	Предел текучести $\sigma_T$ , МПа			Предел прочно- сти $\sigma_B$ , МПа	Относительное уд- линение $\delta$ , %			Параметры $n$ формуемости $r$		
	Толщина, мм				Толщина, мм					
	Макс. 0,50	0,50 —0,70	>>0,70		Макс. 0,50	0,50— 0,70	>0,70	0,50— 0,70	>>2,00	0,50— 0,70
DC01	320	300	280	270—410	41	66	28	—	—	—
DC03	280	260	240	270—370	30	32	34	1,3	1,1	—
DC04	250	230	210	270—350	34	36	38	1,6	1,4	0,180
DC05	220	200	180	270—330	36	38	40	1,9	1,7	0,200
DC06	210	190	170	270—330	37	39	41	2,1	1,9	0,220
DC07	200	180	160	270—330	39	41	43	2,3	2,1	0,230

*Примечание.* В таблице:  $r$  — показатель анизотропии;  $n$  — показатель деформационного упрочнения.

По материалу ленту поставляют: особомягкую — ОМ; мягкую — М; полунагартованную — ПН; нагартованную — Н; высоконагартованную — ВН. Она предназначена для выполнения операций вырубки-пробивки, гибки, вытяжки, формовки, изготовления труб, деталей подшипников и других изделий. Механические свойства ленты должны соответствовать нормами, указанным в табл. 4.9.

Таблица 4.9

Состо- яние мате- риала	Сталь	$\sigma_B$ , МПа	Относительное удлинение, %, не менее					
			$\delta_4$ при $l_0 = 4b_0$					$\delta_5$ при $l_0 = 5,65\sqrt{F_0}$
			при толщине ленты, мм					
			<0,5	0,5—0,7	0,7—1,5	1,5—2,2	2,0—2,9	3,0—4,0
ОМ	08кп, 08пс, 10кп	270—390	23	23	23	26	30	32
М	08кп	340—440	17	17	17	18	20	24
ПН	08пс, 08	370—510	7	7	7	18	20	24
Н	10кп	440—590	—	—	—	—	4	4
ВН	10пс, 10	≥540	—	—	—	—	—	—

Лента холоднокатаная резаная из углеродистой стали для холодной штамповки (ГОСТ 19551—74) поставляется толщиной 0,5—3,2 мм, шириной 100—200 мм, изготавливается из сталей 08кп, 08пс, 08.

Лента холоднокатаная из коррозионно стойкой и жаропрочной стали (ГОСТ 4986–79) имеет толщину 0,05–2,0 мм, ширину 6–410 мм и изготавливается из хромоникелевых легированных сталей 20X13, 30X13, 12X18Н9 и др.

Применение листов в рулонах и стальной ленты позволяет в массовом и крупносерийном производстве автоматизировать подачу металла в штамп, повысить эффективность использования металла за счет уменьшения концевых отходов и перемычек, получать на раскройных автоматических линиях требуемые в конкретных производственных условиях заготовки различных размеров.

В настоящее время многие промышленные предприятия, особенно автомобильные заводы, используют листовой прокат, ввозимый из зарубежных стран (Япония, ФРГ, Франция и др.)

В листоштамповочном производстве для разных отраслей промышленности все более широкое применение находит двухслойный и трехслойный листовой прокат. Двухслойный (биметалл) листовой прокат имеет основной слой из углеродистой или низколегированной стали и плакирующий слой из меди, латуни, алюминия, цинка, олова, свинца или коррозионно-стойких сталей и сплавов, никеля и монель-металла, составляющего 10–25% от общей толщины листа (ГОСТ 10885–85).

К числу трехслойных металлов относятся прокат оцинкованный для производства изделий народного потребления и покрытия крыш (ГОСТ 14918–80); прокат освинцованный для изготовления топливных баков; прокат, покрытый тонким слоем олова, — белая жечь, горячего электролитического лужения (ГОСТ 13345–85), применяется в консервном производстве; антифон — материал, состоящий из склеенных между собой тонких листов.

Необходимо отметить, что производство многослойного и композитного листового проката для изготовления различных изделий непрерывно растет.

## **4.2. Листовой прокат из цветных и тугоплавких металлов и сплавов**

Листовой прокат из цветных металлов и сплавов обладает высокой удельной прочностью, малой плотностью, высокой коррозионной стойкостью, теплопроводностью, малым электрическим сопротивле-

нием. Область применения этого вида проката чрезвычайно обширна. Особенно это касается авиационной, космической и судостроительной отраслей промышленности [5].

Листовой прокат титановых сплавов ВТ1, ВТ3-1, ВТ6-С, ВТ8, ВТ10, ВТ14, ВТ16, ОТ-4, ОТ4-1 и др. применяется для изготовления деталей и узлов, работающих в режиме сверхзвуковых скоростей и воздействия высоких температур. Каркасные и корпусные детали из этих сплавов подвергаются аэродинамическому нагреву до 500 °С. Профили балки, панели, составляющие набор корпуса и обшивку, должны обеспечивать не только заданную прочность теоретического обвода, не только прочностные характеристики при комнатной температуре, но и отвечать требованиям ползучести, теплостойкости, жаростойкости при сохранении минимального веса.

Легирование сплавов титана алюминием, хромом, молибденом, марганцем и железом повышает их прочность и сообщает высокую свариваемость.

Листовые титановые сплавы в целом относятся к классу труднообрабатываемых конструкционных материалов.

По признаку технологической пластичности при комнатной температуре сплавы подразделяются на три категории:

А — сплавы малой прочности и нормальной пластичности: ВТ1-00, ВТ1-0, ОТ4-0, ОТ4-1. Для этих сплавов временное сопротивление зависит от толщины материала и составляет для сплавов ВТ1-00, ВТ1-0  $\sigma_B = 30...45 \text{ кг/мм}^2$ , а для сплавов ОТ4-0, ОТ4-1  $\sigma_B = 40...75 \text{ кг/мм}^2$ . Относительное удлинение  $\delta = 23 \%$ ;

Б — сплав средней прочности и пониженной пластичности: ОТ4, у этого сплава  $\sigma_B = 70...90 \text{ кг/мм}^2$  и  $\delta = 20...12 \%$ ;

В — сплавы высокой прочности и низкой пластичности: ВТ6С, ВТ20. Для сплава ВТ6С  $\sigma_B = 85...100 \text{ кг/мм}^2$  и  $\delta = 12...10 \%$ . Для сплава ВТ20  $\sigma_B = 100...120 \text{ кг/мм}^2$  и  $\delta = 9...6 \%$ .

Титановые сплавы чувствительны к концентрации напряжений, а также к остаточным напряжениям. Технические требования к листовому прокату из этих сплавов отражены в ОСТ 1.90218–76 «Листы из титановых сплавов. Технические требования».

Обычно детали из титановых сплавов изготавливаются штамповкой с предварительным подогревом до температур 350–500 °С, а иногда 850–900 °С.

Область применения титановых сплавов благодаря их уникальным свойствам расширяется.

Листовой прокат из алюминия и алюминиевых сплавов (ГОСТ 21613–82) марок А2, А3, АМц, АМг2, АМгц6, Д1, Д16, В95, ВАД23 и др. широко применяется для изготовления деталей обшивок и каркасов летательных аппаратов и судов, что объясняется относительно небольшой плотностью алюминия, высокой прочностью и коррозионной стойкостью его сплавов. Это же относится и к магниевым сплавам (ГОСТ 22653–77) марок МА1, МА5, МА8 и др. Алюминиевые и титановые сплавы применяются также для изготовления товаров народного потребления.

Медь (ГОСТ 495–77) марок М1, М2, М3 и др. и сплавы меди — латуни (ГОСТ 931–78) марок Л68, Л63, ЛС59-1 и др. широко применяются в электротехнической, электронной, приборостроительной и других отраслях промышленности.

Одной из особенностей развития современной техники является резкое повышение требований к служебным свойствам материалов, используемых для изготовления деталей машин, аппаратов и приборов. В связи с этим все более широкое применение находят металлы и сплавы, обладающие высокой прочностью, жаростойкостью, коррозионной и радиационной стойкостью. К таким металлам относятся тугоплавкие металлы: тантал, молибден, цирконий, ниобий, иридий и др. Эти металлы и сплавы широко используются для изготовления приборов электронной и вакуумной техники, деталей и узлов ядерных реакторов, деталей ракет, критических сечений сопел реактивных двигателей и пр. Так, например, наибольшую часть номенклатуры деталей, изготавливаемых из молибдена и его сплавов, представляют тонкостенные осесимметричные детали (цилиндры, стаканы, трубки переменных диаметров, ступенчатые колпачки, чашечки и др.) и различные плоские детали.

Сплавы на основе молибдена используются главным образом как жаростойкие конструкционные материалы. Наиболее широко применяются сплавы марок ВМ-1, ЦМ-2 и ВМ-2. Механические свойства сплавов молибдена зависят от состава и температуры сплава (табл. 4.10).

Таблица 4.10

**Механические свойства сплавов молибдена при кратковременных испытаниях  
(средние значения)**

Температура, °С	Модуль упругости $E$ , ГПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %
20	330	700–800	7–30
1200	270	300–450	10–15

Из листов наиболее пластичных сплавов при 200–500 °С можно изготавливать различные детали с большой степенью вытяжки. При температуре выше 400 °С, деформирование необходимо проводить в защитной атмосфере, в частности в атмосфере водорода, поскольку при высоких температурах сплавы молибдена интенсивно окисляются.

Наилучшей штампуемостью обладает листовой молибден с деформированной структурой после снятия напряжений. Такой металл имеет тонковолокнистую структуру и штампуются лучше, чем рекристаллизованный металл с крупным зерном. Температура отжига для снятия напряжений составляет 1000–1100 °С.

Для изготовления деталей широко применяются сплавы молибдена, полученные методами порошковой металлургии. Из таких сплавов получают методами прокатки листы и пластины, которые служат заготовкой для последующей штамповки, например, прокат молибденовый листовой высокой точности из сплава марки М99,9-МП. Механические свойства листового молибденового проката сплава М99,9-МП представлены в табл. 4.11.

Таблица 4.11

**Гарантированные механические свойства проката М99,9-МП**

Толщина, мм	Прочность, $\sigma_B$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %
	не менее	
0,33–0,5	760	6
0,5–1,5	725	10
1,5–2,5	690	14
2,5–4,75	690	18
4,75–12,7	690	10
12,7–25,4	655	2*
25,4–38	655	1*

*Примечание.* Параметры  $\sigma_B$  и  $\delta$  определяются на образцах, поперечных направлению прокатки.

По финишному способу обработки давлением различают горячекатаный и холоднокатаный прокат, термически обработанный, в отожженном для снятия внутренних напряжений состоянии, с необработанной или обработанной поверхностью после прокатки.

### 4.3. Неметаллические материалы

По своей структуре, физическим и механическим свойствам неметаллические материалы существенно отличаются от металлов и сплавов. Большинство неметаллических материалов имеет слоистую и волокнистую структуру. Созданные в настоящее время высокомолекулярные соединения по многим физическим и механическим характеристикам приближаются к традиционным конструкционным материалам, а по некоторым и превосходят их. Например, удельные прочностные характеристики (прочностные характеристики, отнесенные к плотности) не ниже, а иногда и выше, чем у металлов. Так, удельная прочность текстолита — 8, а углеродистой качественной стали марки 10кп — только 4–5.

Неметаллические листовые материалы, применяемые для листовой штамповки, можно разделить на четыре основные группы [3, 4]:

- пластические массы, слоистые и волокнистые пластики, термопластики однородной структуры;
- материалы на основе бумаги и резины;
- материалы минерального происхождения.;
- комбинированные материалы сложной композиции (металл-пластмасса, металл-асбест-резина и др.).

Материалы первой группы слоистой и волокнистой структуры представляют собой композицию из искусственных смол и наполнителей органического или минерального происхождения. Такие материалы легко перерабатываются в детали и изделия и удовлетворяют самым разнообразным требованиям в машиностроении, авиационной и космической технике, судостроении и пр. К слоистым листовым пластикам относятся гетинакс, текстолит, стеклотекстолиты и др. К листовым материалам однородной структуры относятся органическое стекло, полистирол, винипласт, целлулоид и др.

К материалам второй группы относят резину, картон, эбонит, фибру, а также войлок, фетр, латоктани и др.



Третью группу представляют асбест, слюда и материалы на их основе: параниты, миканиты и др.

К материалам четвертой группы относятся многочисленные комбинированные материалы: фольгированные слоистые пластики, асбостальные листы, листовые металлы, покрытые слоем полихлорвиниловой смолы (металлопласты) и многие другие. К этой же группе относятся и композиционные материалы (композиты), применяемые для изготовления ряда деталей машин и транспортных средств, автокузовные детали, детали самолетов, планеров, ракет и судов. Это перспективные материалы, состоящие из полимеров, армированных углеродным волокном. Производство и применение этих материалов постоянно растет.

Относительная жесткость таких материалов в 5–9 раз больше, чем у низкоуглеродистой стали при весьма высокой коррозионной стойкости.

---

## 5. Разделительные операции листовой штамповки

**К** разделительным операциям относятся [5]:

- отрезка — полное отделение части заготовки по незамкнутому контуру путем сдвига;
- разрезка — разделение заготовки на части по незамкнутому контуру (с отходом и без отхода);
- надрезка — неполное отделение части заготовки путем сдвига;
- обрезка — удаление излишков металла (припусков, облоя) путем сдвига;
- вырубка — полное отделение заготовки или изделия от исходной заготовки по замкнутому контуру путем сдвига;
- пробивка — образование в заготовке отверстия или паза путем сдвига с удалением части металла в отход;
- проколка — образование в заготовке отверстия без удаления металла в отход;
- зачистка — удаление технологических припусков с помощью штампа с образованием стружки для повышения точности размеров и уменьшения шероховатости штампованной заготовки;
- высечка — полное отделение заготовки или изделия по замкнутому контуру путем внедрения инструмента в материал исходной заготовки;
- просечка в штампе — образование отверстия в заготовке путем внедрения инструмента с удалением части материала в отход.

### 5.1. Разрезание листов на полосы и карты

Перед выполнением той или иной операции штамповки листовой материал, поступающий в штамповочный цех в виде отдельных листов, лент или рулонов, подвергается в заготовительном отделении

цеха разрезанию на полосы или отдельные заготовки, карты. Для этого используют приводные ножницы с параллельными и наклонными ножами, дисковые ножницы с одной или несколькими парами цилиндрических или дисковых ножей, вибрационные ножницы, а также лазерную резку. Разрезание листов (полос) на штучные заготовки осуществляют также в отрезных штампах на прессах.

Для разрезания листы предварительно укладывают в стопы. К ножницам для разрезания листы подаются либо вручную, либо с помощью листоукладчиков, которые оснащаются контролирующими устройствами, автоматически останавливающими ножницы в случае подачи одновременно двух заготовок. Для отделения одной заготовки из стопы листов, слипающихся из-за наличия слоя смазочного материала между листами, листоукладчики оснащаются электромагнитными распушителями, которые намагничивают торец каждого листа, что заставляет их отталкиваться друг от друга. Это обеспечивает надежное отделение верхнего листа от пачки. Для отделения верхнего листа используют также подвижные или закрепленные присоски, которые приподнимают конец листа, исключая возможность слипания.

Для резки рулонного проката на ленты и карты применяют специальные линии поперечного и продольного раскроя, которые включают разматыватель, подающие ролики, дисковые ножницы и пр. Для получения деталей (заготовок) прямоугольной, трапецеидальной формы, а также с криволинейным контуром, применяют автоматические раскройные линии для резки из широкого рулонного проката.

В штамповочных цехах все более широкое применение получает лазерная резка. В этом случае, как и в большинстве технологических процессов с применением лазера, используется термическое действие света, вызываемое его поглощением в обрабатываемом материале.

Особенностями лазерной технологии является высокая плотность потока излучения в зоне обработки; короткое время импульса; локальные воздействия излучения; бесконтактный ввод энергии в зону обработки и возможность ведения технологического процесса в любой прозрачной среде.

Существующие лазеры по роду материалов, используемых для получения индуцированного излучения, делятся на четыре основных типа: твердотельные с оптическим возбуждением, полупроводниковые, жидкостные и газовые. Наиболее многочисленно семейство газовых лазеров.

Лазерные установки имеют мощность 250–6000 Вт. Диаметр лазерного пучка составляет 0,2–0,3 мм. Благодаря этому ширина реза не превышает 0,2–0,5 мм. Скорость резки прямо пропорциональна мощности излучения лазера и обратно пропорциональна толщине материала, его теплопроводности и площади формального пятна.

Отечественные установки мощностью 500–1000 Вт обеспечивают приемлемые для практики скорости резания — несколько метров в минуту и позволяют получать разрезы сложной конфигурации. Толщина разрезаемой стали — до 7 мм, пластика — до 30 мм. Скорость резания стали толщиной 2 мм составляет 2 м/мин, стали с покрытием толщиной 1,5 мм — 5 м/мин, хромоникелевой стали толщиной 2 мм — 1,5 м/мин.

Преимущества лазерной резки:

- возможность получения узкого реза с малой зоной термического воздействия;
- минимальные неровности реза;
- малые деформации;
- отсутствие физического контакта с инструментом;
- возможность обработки сверхмягких, сверхтвердых, тугоплавких, токсичных и других материалов;
- возможность получения контура сложной формы;
- полная автоматизация процесса.

Резку листового материала толщиной 5–100 мм и более осуществляют с помощью плазменной резки, а также резки эрозионным способом.

Если контур разделения при раскрое листового материала криволинейный замкнутый или сложный криволинейный незамкнутый, для вырубки применяют штампы.

## **5.2. Раскрой листового материала**

Раскрой полосы (ленты) — это отыскание наиболее эффективного размещения заготовок (или плоских деталей) в листе (полосе, ленте), относительно друг друга и кромок листового проката.

### **5.2.1. Типы раскроя**

При разрезке листового проката на полосы различают варианты разрезки: поперечный, продольный и комбинированный (рис. 5.1).

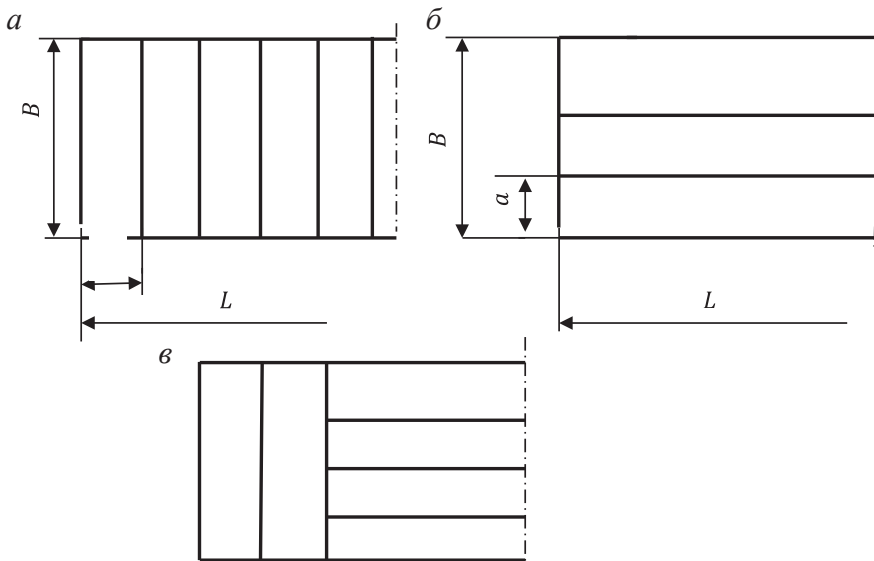


Рис. 5.1. Виды раскрой листового проката на полосы:  
 а — поперечный; б — продольный; в — комбинированный

Раскрой листа на полосы выполняется с учетом не только экономии металла, но и технологических факторов и производительности труда при резке. Например, при раскрое листа на полосы необходимо учитывать ориентировку продольной оси детали (заготовки) относительно направления волокон металла, в частности, если заготовки подвергаются гибке, то направление волокон металла должно быть перпендикулярным линиигиба. При продольной резке производительность выше, чем при поперечной, но продольная разрезка не всегда обеспечивает наилучшее использование металла.

Для раскроя листового материала в целях получения заготовок (плоских деталей) существует три типа раскроя: с отходами, малоотходный и безотходный.

При раскрое с отходами деталь получают вырубкой по замкнутому контуру. Между деталями, а также между деталями и кромкой полосы или листа оставляют перемычки. При этом раскрой с перемычками по всему контуру применяют при штамповке деталей, имеющих в основном криволинейные очертания и повышенную точность размеров.

Различают два вида перемычек: между краями соседних деталей  $a_1$  и между краями детали и кромкой листа или полосы  $a$ . Последние называют боковыми перемычками. Эти перемычки обычно в 1,15–1,3

раза больше, чем перемычки между деталями, из-за возможных отклонений размера полосы по ширине и непрямолинейности боковых кромок. Основное назначение перемычки — компенсировать погрешности подачи материала и фиксации ее в штампе с тем, чтобы обеспечить полную вырубку детали пор всему контуру и предотвратить получение бракованных деталей.

Ширину перемычек выполняют наименьшей для снижения расхода металла и уменьшения усилий, необходимых для снятия материала с пуансона. Перемычка должна быть достаточно жесткой, поскольку при малой жесткости она может быть втянута в зазор между пуансоном и матрицей. Это может привести к снижению стойкости инструмента и даже к его разрушению. Недостаточность жесткости перемычек снижает точность шага штамповки из-за упругого изгиба перемычки при подаче. Ширина перемычки зависит от толщины штампуемого металла, его твердости, длины прямолинейных участков штампуемой детали (чем она больше, тем больше упругие деформации перемычки), способа подачи полосы, конструкции штампа. Ширину перемычек определяют по специальным таблицам, которые составлены на основании обобщения опыта работы предприятий. В зависимости от перечисленных факторов ширина перемычек изменяется в пределах 1,0–3,2 мм при толщине металла менее 4 мм и в пределах 2,5–6,5 мм при толщине металла 4–10 мм.

Малоотходный раскрой характеризуется отсутствием боковых перемычек, при этом ширина полосы  $B$  должна быть равна ширине штампуемой детали.

Безотходный раскрой применяют при штамповке деталей, контур которых сопрягается друг с другом. Перемычки отсутствуют.

Пример указанных типов раскроя приведен на рис. 5.2.

Вообще различают шесть основных видов раскроя деталей (заготовок) в полосе. Область их применения определяется формой и размерами штампуемых деталей:

- прямой раскрой — детали простой геометрической формы: прямоугольник, овал, круг;
- наклонный раскрой — детали Г-образной и другой сходной формы;
- встречный раскрой — детали Т- и Ш-образной формы;
- комбинированный раскрой — детали разной формы, но одинаковой толщины из одного и того же материала;

- многорядный раскрой — в крупносерийном и массовом производстве при штамповке деталей небольших размеров;
- при штамповке мелких и узких деталей (например, стрелок часов) из мерной полосы или ленты, раскрой с вырезкой перемычек.

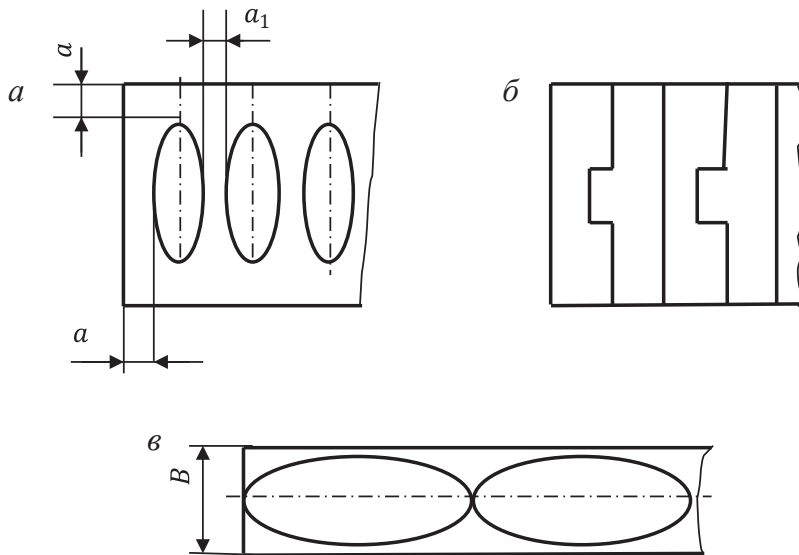


Рис. 5.2. Типы раскроя:

*a* — с отходами; *b* — безотходный; *в* — малоотходный

### 5.2.2. Показатели эффективности раскроя

В себестоимости деталей, полученных листовой штамповкой, затраты на материал составляют 50–70 %. В связи с этим наиболее эффективным способом снижения себестоимости является экономия металла за счет снижения массы расходов. Каждый процент уменьшения массы отходов позволяет снизить себестоимость штампованной детали на 0,4–0,5 %. Отсюда возникает проблема оптимизации раскроя листового и сортового проката.

Мерой эффективности раскроя согласно ГОСТ 18970–84 служит  $K_{\text{и}}$ , равный отношению массы деталей, полученных из одной заготовки (листа, прутка), к массе исходной заготовки. Обычно толщина деталей, штампуемых из листового проката, неизменна во всех точ-

ках и равна толщине листа. В таком случае коэффициент использования металла можно рассматривать как отношение площади всех деталей (или заготовок), штампуемых из листа  $nf_{\text{д}}$ , к площади листа  $B \times L$ , из которого они получают вырубкой,

$$K_{\text{и}} = \frac{nf_{\text{д}}}{BL},$$

где  $n$  — количество деталей;  $f_{\text{д}}$  — площадь штампуемой детали;  $B$  — ширина листа;  $L$  — длина листа.

При наличии в детали отверстий, коэффициент использования деталей

$$K_{\text{и}} = \frac{n(f_{\text{д}} - f_{\text{отв}})}{BL},$$

где  $f_{\text{отв}}$  — площадь отверстия.

Мерой эффективности раскроя служит также коэффициент раскроя  $K_{\text{раск}}$ , который равен отношению площади, ограниченной внешним контуром штампуемой детали, к площади листа, из которого эти детали штампуют. Если деталь не имеет отверстий, то коэффициент раскроя и коэффициент использования металла совпадают  $K_{\text{и}} = K_{\text{раск}}$ . Таким образом, коэффициент раскроя  $K_{\text{раск}}$  зависит от внешнего контура деталей и их взаимного расположения на листе, а коэффициент использования  $K_{\text{и}}$  металла, кроме указанных факторов, зависит еще и от наличия в детали отверстий.

Коэффициент использования металл  $K_{\text{и}}$  — главный показатель, который определяет как эффективность использования металла, так и технологичность конструкции штампуемой детали. Чем он выше, тем выше эффективность раскроя и тем технологичнее штампуемая деталь.

### 5.2.3. Выбор вида раскроя

Выбор наиболее рационального вида раскроя осуществляют опытно-графическим или аналитическим (расчетным) путем.

Опытно-графический способ применяют в мелкосерийном производстве при раскрое деталей (или заготовок) сложной формы. Для отыскания наиболее выгодного раскроя вырезают 2–3 шаблона штампуемой детали из бумаги или картона. Придавая этим шаблонам, различные взаимные расположения в полосе, находят такое, при котором



отход материала будет наименьшим. При окончательном установлении ширины полосы и шага штамповки учитывают продольные и боковые перемычки.

Аналитический (расчетный) способ определения раскроя может быть применим лишь в случаях, когда установлена функциональная связь между параметрами раскроя и коэффициентом использования металла.

Способ раскроя листа (полосы), как и способ расположения деталей в полосе, влияет на величину  $K_{\text{и}}$ . Раскрой листа выполняют не только с учетом экономии металла, но и технологических факторов, а также производительности труда при порезке ножницами. Ниже приводится пример определения коэффициента использования металла  $K_{\text{и}}$  для круглых деталей (заготовок), которые могут быть расположены в полосе в несколько рядов при параллельном или шахматном раскрое (рис. 5.3) [5].

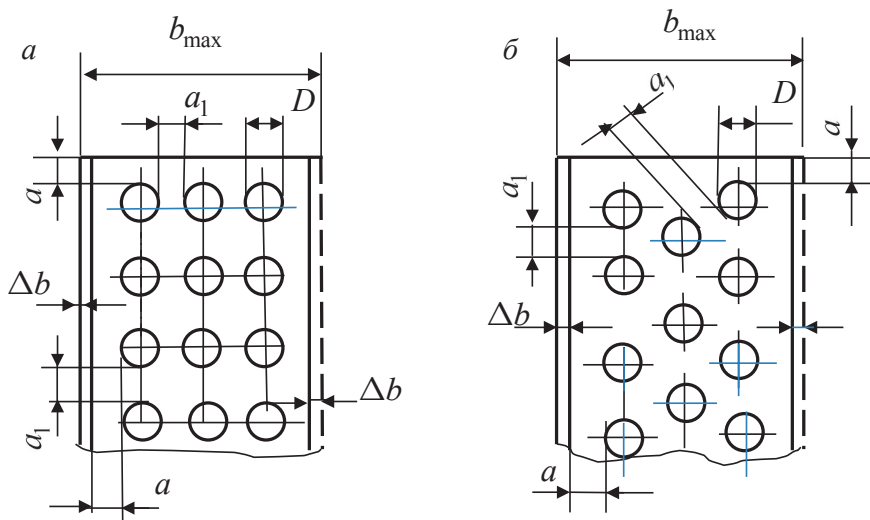


Рис. 5.3 Схема раскроя круглых заготовок:

$a$  — параллельный;  $b$  — шахматный

Вначале обычно выбирают тип раскроя и число рядов  $N$  деталей в полосе в зависимости от размеров детали (заготовки), удобства работы с полосой, программы выпуска. После этого определяют величину перемычек  $a$  и  $a_1$ , допуск на ширину полосы  $\Delta b$ , зазор между краями полосы и направляющей линейкой штампа и пр.

С учетом выбранных параметров определяют ширину полосы по формулам, полученным геометрическим путем:

- при параллельном раскрое без применения бокового прижима

$$b_{\text{пар}} = ND + 2a + (N - 1)a_1 + 2\Delta b + z;$$

- при шахматном раскрое без применения бокового прижима

$$b_{\text{шах}} = D + 2a + (N - 1)(D + a_1) + 2\Delta b + z. \quad (5.1)$$

После установления ширины полосы определяют число полос  $m$  из листа. При этом необходимо учитывать варианты разрезки полосы на полосы (рис. 5.1), поскольку тип разрезки так же, как способ расположения деталей в полосе, влияет на коэффициент использования металла  $K_{\text{и}}$ .

При продольном расположении полос в листе

$$m_{\text{пар}} = \frac{B}{b_{\text{пар}}} \text{ или } m_{\text{шах}} = \frac{B}{b_{\text{шах}}},$$

при поперечном расположении полос в листе

$$m_{\text{пар}} = \frac{L}{b_{\text{пар}}} \text{ или } m_{\text{шах}} = \frac{L}{b_{\text{шах}}}.$$

Далее определяют число деталей  $k$  в полосе для различных способов раскроя и различных вариантов разрезки листа на полосы.

При параллельном раскрое деталей в полосе и продольной разрезке листа на полосы число деталей в полосе (при  $a \cong a_1$ )

$$k_L = \frac{N(L - a)}{D + a_1}.$$

Соответственно при поперечной разрезке листа на полосы

$$k_B = \frac{N(B - a)}{D + a_1},$$

при шахматном раскрое число заготовок

$$k = N_1 l_1 + N_2 l_2,$$

где  $N_1$  и  $N_2$  — число рядов вдоль полосы с наибольшим и наименьшим числом заготовок соответственно;  $l_1$  и  $l_2$  — число рядов поперек полосы с наибольшим и наименьшим числом заготовок соответственно.

Учитывая, что  $N_2 = N_1 - 1$ , получим

$$k = N_1 l_1 + l_2 (N_1 - 1). \quad (5.2)$$

Учтем, что при  $l_1 = l_2$  число рядов поперек полосы  $l = l_1 + l_2$  всегда будет четным, а при  $l_2 = l_1 - 1$  число рядов поперек полосы будет нечетным. В таком случае подставив соотношения  $l_1 = l_2$  и  $l = l_1 + l_2$  в формулу (5.2), получим число заготовок из полосы при четном числе рядов

$$k = 0,5(2N_1 - 1). \quad (5.3)$$

Подставив в формулу (5.2) соотношения  $l_2 = l_1 - 1$  и  $l = l_1 + l_2$ , получим число заготовок из полосы при нечетном числе рядов

$$k = 0,5[N_1(l+1) + (N_1 - 1)(l-1)]. \quad (5.4)$$

В формулах (5.3) и (5.4)  $N_1$  определяется из формулы (5.1) при  $\Delta b = 0$ ,  $z = 0$  и  $a = a_1$

$$N_1 = \frac{b-a}{D+a_1}.$$

Число рядов поперек полосы  $l$  зависит от типа разрезки полосы в листе; при разрезке полосы поперек листа

$$l = \frac{B-2a-D}{(D+a_1) \cdot 0,866} + 1,$$

где  $B$  — ширина листа,  
при раскрое полосы вдоль листа

$$l = \frac{L-2a-D}{(D+a_1) \cdot 0,866} + 1,$$

где  $L$  — длина листа.

Зная число  $m$  полос из листа и число заготовок  $k$ , получаемых из полосы для различных типов раскроя и способов расположения полос в листе (вдоль и поперек листа), можно определить число заготовок, получаемых из листа

$$n = mk.$$

Коэффициент использования металла  $K_{\text{и}}$  определится тогда из формулы

$$K_{\text{и}} = \frac{0,785D^2 n}{BL}.$$

Расчеты показывают, что шахматный раскрой эффективнее раскроя с параллельным расположением деталей в полосе. Эффективность шахматного раскроя увеличивается с увеличением числа рядов. Многорядный раскрой обычно применяют при штамповке круглых деталей сравнительно небольшого диаметра — до 100–120 мм. При этом число рядов рекомендуется принимать от 10 при диаметре заготовки до 10 мм и до 1–2 при диаметре заготовки свыше 120 мм.

Штамповка непосредственно из листа без предварительной отрезки полос более эффективна, чем штамповка из полосы. В этом случае при штамповке непосредственно из листа применяют автоматическую подачу к штамповочным прессам.

В настоящее время существуют пакеты прикладных программ «Раскрой-80», «Раскрой-АРМ», САПР «Техтран», «Сириус», T-Flex и другие для проектирования оптимального раскроя металла. Эти программы предназначены для отыскания оптимального раскроя фигурных заготовок в полосе и оптимального раскроя листа на полосы. Пакеты составлены на базе классификации деталей (заготовок) с учетом следующих данных: вида исходного материала (лист, полоса, лента); типа штампа (простой, совмещенный, последовательного действия); особенностей конструкции штампа; способа подачи материала в штамп; рядности раскроя; вида раскроя (безотходный, малоотходный, с отходами). Использование программ для оптимизации раскроя листового материала позволяет повысить коэффициент использования металла в среднем на 5–10 %.

#### 5.2.4. Разрезка и отрезка листового проката

**Механизм деформирования. Оптимальный зазор.** Разделительные операции осуществляются воздействием режущих кромок инструмента (ножей) на противоположные поверхности заготовки. Процесс разрезки (отрезки) листовых материалов состоит из трех последовательных стадий: упругой, пластической и разрушения (скалывания). Процесс начинается с упругой деформации, когда верхний нож входит в соприкосновение с листом и образуется поверхность контакта [5, 6].

Силы  $P$ , приложенные к противоположным поверхностям заготовки, благодаря наличию зазора  $z$  между режущими кромками, образуют момент. Вследствие этого происходит поворот заготовки относительно

ножей. Это приводит к возникновению бокового распирающего усилия  $T$  (рис. 5.4). Величина этого усилия при отрезке с прижимом составляет  $T = (0,1...0,3)P$ , при отрезке без прижима  $T \approx 0,4 P$ , где  $P$  — усилие отрезки.

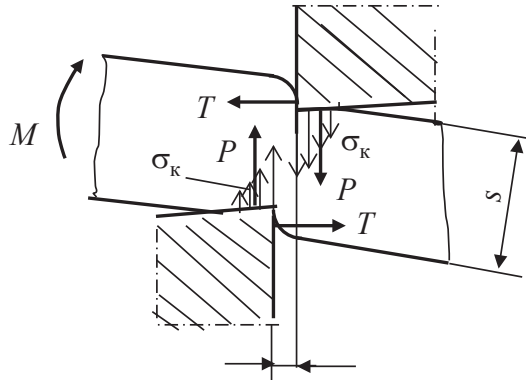


Рис. 5.4. Силы, действующие при разделении материала

В результате поворота заготовки, контактные напряжения  $\sigma_k$  имеют максимальную величину у режущих кромок и резко уменьшаются до нуля на границе контактного участка. Концентрация напряжений у режущих кромок приводит к тому, что в этих местах, по мере внедрения в лист режущих кромок с усилием  $P$  до некоторой глубины, возникает очаг пластической деформации. По мере роста деформирующего усилия, размеры очага деформации увеличиваются. В определенный момент деформирования очаги деформации, распространяющиеся от режущих кромок, сливаются, образуя единый очаг деформации.

Дальнейшее сближение режущих кромок приводит к тому, что появляется смещение (сдвиг) одной части заготовки относительно другой в направлении относительного движения режущих кромок. На стадии сдвига слои металла, параллельные плоскостям заготовки, изгибаются и удлиняются. Поскольку очаг деформации зарождается у режущих кромок, то и накопленная в процессе сдвига интенсивность деформаций будет максимальной вблизи режущих кромок. Для каждого металла и данной схемы напряженного состояния существует предельное значение интенсивности деформаций, которую может выдержать металл без разрушения. По мере сближения режущих кромок, наступает момент, когда пластичность металла будет исчерпана и начнется разрушение заготовки.

Зарождение трещины происходит у режущей кромки (рис. 5.5). Она быстро развивается в толщину заготовки, и, при встрече трещин, идущих от режущих кромок навстречу друг другу, процесс разделения заготовки заканчивается. Образование единой поверхности раздела является результатом слияния трещин, берущих начало от острых кромок обоих режущих инструментов.

Разрушение (скалывание) завершается при внедрении ножа на глубину проникновения  $h$ , величина которого в зависимости от толщины металла  $s$  и его механических свойств, колеблется в пределах  $(0,2...0,8)s$ .

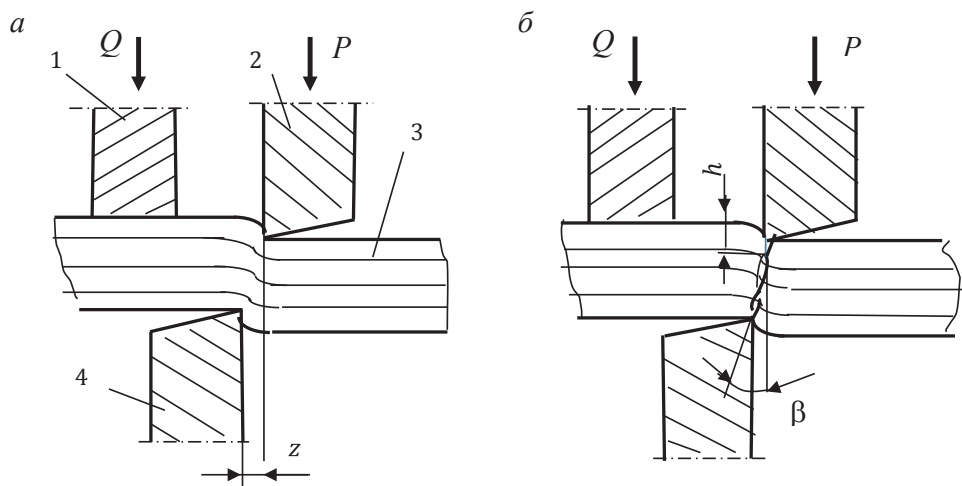


Рис. 5.5. Начальная (а) и конечная (б) стадии процесса отрезки ( $Q$  — усилие прижима):

1 — прижим; 2 — верхний нож; 3 — разрезаемый материал; 4 — нижний нож

При разрезке на поверхности среза образуется неровная поверхность материала [7]. На ней (рис. 5.6) различаются три зоны. Зона I — скругленный край, образованный в результате смятия и изгиба поверхности разрезаемого листа, примыкающей к режущей кромке. Зона II — блестящая поверхность, соответствующая пластической стадии процесса отрезки. Блестящий пояс — результат внедрения верхней режущей кромки. Зона III — поверхность разрушения, образованная трещинами, идущими от режущих кромок. Эта поверхность обычно слегка повернута от вертикали под углом  $\beta = 4...6^\circ$  к свободным поверхностям заготовки. Этот угол увеличивается с увеличением пластичности металла.

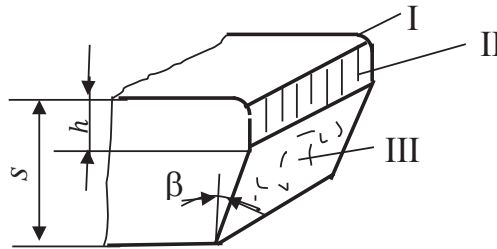


Рис. 5.6. Профиль среза полосы

Качество отрезки (поверхности среза) зависит от зазора между ножами, их режущей способности, свойств разрезаемого металла. Чем пластичнее металл, тем позже начинается образование трещины. Для получения наиболее гладкой поверхности среза необходимо, чтобы идущие от режущих кромок трещины слились кратчайшим путем. В этом случае зазор между ножами будет оптимальным.

Оптимальный зазор определяется по формуле [5,6]

$$z_{\text{опт}} = (s - h) \operatorname{tg} \beta. \quad (5.5)$$

Отсюда следует, что совпадение трещин и, следовательно, качество реза обеспечивается определенным зазором, величина которого зависит от свойств разрезаемого материала, состояния прокатанного листа и его структуры. Как следует из формулы (5.5), величина  $z_{\text{опт}}$  увеличивается с увеличением толщины разрезаемого материала и уменьшением величины  $h$ . Высота блестящего пояска с изменением пластичности металла меняется в большем диапазоне, чем угол  $\beta$ , и зазор должен уменьшаться с увеличением пластичности металла.

Расклинивающее действие сил  $P$  и  $T$ , особенно при наличии при- тупления режущих кромок, может приводить к тому, что зарождение трещин происходит несколько выше торца режущего инструмента и на отдельных частях заготовки образуются острые торцовые заусенцы, появление которых нежелательно по соображениям техники безопасности (возможность порезов при ручной подаче). Кроме того, торцовые заусенцы могут сказываться на точности подачи заготовки при механизированных подачах. Высота заусенцев возрастает по мере при- тупления режущих кромок, а также при увеличении зазора  $z$ .

Пластическая деформация отделяемых слоев металла вблизи по- верхности среза создает зону упрочненного металла. Ширина зоны

пластических деформаций зависит от свойств металла (чем пластичнее металл, тем шире зона пластических деформаций), от зазора  $z$  (увеличивается с ростом последнего), от степени притупления режущих кромок (увеличивается с ростом притупления) и от скорости деформирования (уменьшается с увеличением скорости деформирования).

В связи с этим в ряде случаев при проектировании технологических процессов приходится учитывать наличие упрочненной зоны, образовавшейся при выполнении разделительных операций, т. к. наличие наклепанного слоя может привести к появлению трещин в зоне наклепа при последующих технологических операциях или к интенсивному протеканию коррозионных процессов при эксплуатации.

#### **Отрезка на ножницах с возвратно-поступательным движением ножей.**

Отрезка на ножницах используется обычно как заготовительная операция. Резку листового материала производят для изготовления полос и заготовок, поступающих в дальнейшем на штамповку, и для получения заготовок, максимально соответствующих по форме и размеру готовой детали и поступающих прямо на сборку или обработку резанием.

Для резки листов или лент используются кривошипные ножницы с возвратно-поступательным и вращательным движением ножей. Для отрезки листового металлопроката толщиной до 10–12 мм наиболее широко применяются ножницы с механическим приводом. Это кривошипные ножницы с наклонным ножом (гильотинные, аллигаторные, вибрационные), а также ножницы с параллельным ножом и сортовые ножницы для резки сортового проката. Для резки толстолиствого проката толщиной до 40 мм используют ножницы с гидравлическим приводом и наклонным ножом разной формы.

У гильотинных ножниц, для уменьшения усилия отрезки, верхний нож расположен под небольшим углом наклона  $\gamma$  к нижнему (рис. 5.7). При этом угол наклона верхнего ножа  $\gamma$  должен быть меньше угла трения между листом и верхним ножом, в противном случае лист будет не разрезаться, а смещаться в сторону.

Характеристиками гильотинных ножниц являются число ходов в минуту, наибольшая ширина разрезаемого листа (длина реза), вылет и наибольшая толщина разрезаемого материала при заданном пределе прочности  $\sigma_B$  или сопротивления срезу  $\sigma_{ср}$  при угле наклона верхнего ножа  $\gamma$ . Согласно ГОСТ 6282–76 наибольшая длина материала, отрезаемого на ножницах с наклонными ножами, может достигать 4000 мм



при наибольшей толщине 40 мм с условием того, что временное сопротивление разрезаемого материала  $\sigma_B \leq 500$  МПа.

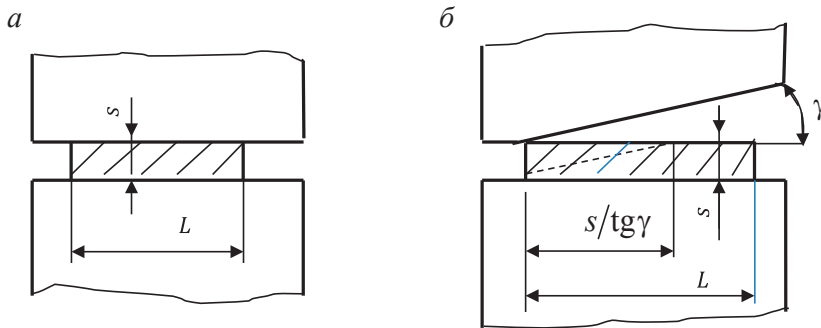


Рис. 5.7. Схема отрезки на ножницах:

а — отрезка параллельными ножами; б — отрезка наклонными ножами

В случае, когда механические свойства разрезаемого материала отличаются от свойств материала, записанного в паспорте гильотинных ножниц, максимально допустимую толщину материала  $s_{\max}$ , которую можно резать, не опасаясь перегрузки гильотинных ножниц, определяют по формуле

$$s_{\max} \leq s \sqrt{\frac{\sigma_B}{\sigma_B^*}},$$

или

$$s_{\max} \leq s \sqrt{\frac{\sigma_{\text{ср}}}{\sigma_{\text{ср}}^*}},$$

где  $\sigma_B$  и  $\sigma_{\text{ср}}$  — параметры материала, указанные в паспорте ножниц;  $\sigma_B^*$  и  $\sigma_{\text{ср}}^*$  — предел прочности и сопротивление срезу материала, подлежащего резке.

При отрезке наклонным ножом может происходить изгиб (закручивание) полосы вокруг своей оси. Чем больше угол наклона верхнего ножа и меньше ширина полосы, тем изгиб и скручивание больше. Эти дефекты проявляются лишь у полос шириной менее  $20s$ , в особенности при разрезании толстых листов. В связи с этим отрезку узких полос из тонких материалов при повышенных требованиях к качеству реза и неметаллических материалов осуществляют на ножницах с па-

параллельными ножами. В этом случае лист режется сразу по всей ширине, в отличие от отрезки наклонными ножами, когда участок реза перемещается от одного края листа к другому [5].

Качество отрезанных полос (заготовок) определяется по величинам скручивания, изгиба и виду поверхности среза. Поверхность среза должна быть перпендикулярной к поверхности листа, гладкой, без заусенцев. Размер заусенцев увеличивается по мере затупления ножей.

Усилие резания приближенно вычисляется как произведение площади среза ( $F = Ls$ ) на сопротивление срезу  $\sigma_{\text{ср}}$ . Для ножниц с параллельными ножами

$$P = k\sigma_{\text{ср}}F,$$

где  $\sigma_{\text{ср}}$  — сопротивление срезу, МПа;  $k$  — коэффициент, учитывающий притупление режущих кромок ножей, неравномерность толщины разрезаемого материала и его механических свойств,  $k = 1,1 \dots 1,3$ .

Сопротивление срезу  $\sigma_{\text{ср}}$  зависит от механических характеристик разрезаемого материала, величины зазора между ножами, скорости деформирования, условий трения и других факторов. С увеличением прочности материала и уменьшением его пластичности, а также с увеличением скорости деформирования,  $\sigma_{\text{ср}}$  возрастает, с увеличением зазора между ножами — уменьшается.

Сопротивление срезу  $\sigma_{\text{ср}}$  определяется на основании обобщения экспериментальных данных по специальным таблицам, составленным для различных листовых материалов и приведенных в справочной литературе. Приближенно сопротивление срезу  $\sigma_{\text{ср}}$  может быть определено как функция временного сопротивления  $\sigma_{\text{в}}$  разрезаемого материала. Например, для листов из углеродистой стали  $\sigma_{\text{ср}} = (0,7 \dots 0,8)\sigma_{\text{в}}$ .

Усилие резания при отрезке ножницами с наклонным резом определяется по формуле

$$P = \frac{0,5k\sigma_{\text{ср}}s^2}{\text{tg } \gamma}, \quad (5.6)$$

где  $\gamma$  — угол наклона верхнего ножа.

При разрезке ножницами с наклонным ножом усилие резания на установившейся стадии процесса изменяется незначительно. На этом основании работу деформирования  $A$  при разрезке можно вычислить по формуле

$$A = \frac{PH}{1000} = \frac{P(L \operatorname{tg} \gamma + s)}{1000},$$

где  $H = L \operatorname{tg} \gamma$ .

Работа деформирования может быть найдена из другой формулы

$$A = \lambda P_{\max} s,$$

где  $\lambda$  — отношение среднего усилия резки к максимальному,  $\lambda = \frac{P_{\text{ср}}}{P_{\text{max}}}$ ;

$P_{\text{ср}}$  — отношение площади кривой рабочей нагрузки к ходу ножа (толщине заготовки).

Согласно экспериментальным данным при  $s > 2$  мм  $\lambda = 0,75 \dots 0,55$ ; при  $s = 2 \dots 4$  мм  $\lambda = 0,55 \dots 0,45$  и при  $s > 4$  мм  $\lambda = 0,46 \dots 0,30$ . Большие значения  $\lambda$  назначают для тонких и мягких материалов, меньшие — для твердых и более толстых материалов.

Поперечные сечения ножей показаны на рис 5.8.

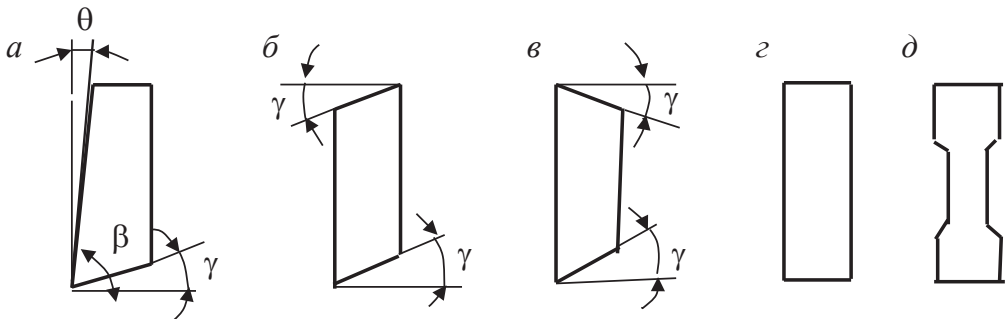


Рис. 5.8. Поперечные сечения ножей ножниц:

$a$  — конструкция ножа:  $\gamma$  — передний угол,  $\gamma = 4 \dots 5^\circ$ ;  $\beta$  — угол резания,  $\beta = 84 \dots 86^\circ$ ;  
 $\theta$  — задний угол,  $\theta = 1 \dots 1,5^\circ$ ;  $б, в$  — ножи с двумя режущими кромками;  $г$  и  $д$  — ножи с четырьмя режущими кромками

Ножи с передним углом  $\gamma = 4 \dots 5^\circ$  применяются для отрезки листового металла толщиной менее 4 мм, с углом  $\gamma = 0^\circ$  — для отрезки толстолистового металла. Наиболее широкое применение имеют ножи прямоугольного сечения, т. к. у них используются все четыре кромки. Усилие резания растет с увеличением глубины внедрения режущей кромки ножа. Усилие можно уменьшить, выбрав более острый угол резания  $\beta$  ножа. При этом уменьшается площадь внедрения ножа в ме-

талл. Однако нож с малым углом резания затупляется значительно быстрее, чем нож с большим углом. При затуплении ножа резко возрастают усилия резания. Угол  $\beta$  выбирают в пределах 80–85°.

Ножи для гильотинных ножниц выполняют цельными или составными в виде отдельных секций. Составными делают ножи при длине более 500 мм во избежание коробления и разрушения при термической обработке. Кроме того, это дает возможность заменять отдельные секции ножа при их затуплении. Цельные ножи и секции изготавливают из сталей марок У8А, У10А, 5ХВ2С, Х12М, 318 и др. Ножи подвергают закалке с отпуском. Твердость ножей из углеродистых сталей HRC 56–58, из легированных HRC 58–60. Увеличение твердости ножей приводит к выкрашиванию режущих кромок, а снижение твердости — к их быстрому затуплению.

**Резка на вибрационных ножницах.** Вибрационные ножницы представляют собой ножницы с наклонным ножом. У этих ножниц нижний нож закреплен на станине неподвижно, а верхний нож совершает возвратно-поступательное (вибрирующее) движение. Это движение передается ножу от специального кулачкового механизма, который совершает 1200–2500 ходов в минуту. Вибрационные ножницы применяют обычно для вырезки внешних и внутренних криволинейных контуров с радиусами скругления не менее 12–15 мм. Перекрытие ножей у этих ножниц отсутствует, а зазор между ножами больше оптимального (0,2–0,25 толщины разрезаемого металла). Это дает возможность поворачивать заготовку относительно кромок ножей в процессе вырезки криволинейного контура.

Толщина разрезаемого металла обычно не превышает 3 мм. Точность вырезаемой заготовки (детали) соответствует 16-му качеству. Угол створа ножей вибрационных ножниц составляет 24–30° (больше самотормозящего), поэтому лист подается к ножам принудительно. Ход ножниц изменяется в пределах 2–4 мм.

При резке на вибрационных ножницах по контуру вырезанной заготовки (детали) образуются заусенцы и зарубы, что требует дополнительного фрезерования по контуру заготовки. По сравнению с гильотинными ножницами, у вибрационных ножниц происходит более быстрое изнашивание ножей. Вибрационные ножницы применяют только в мелкосерийном производстве из-за их низкой производительности.

**Отрезка на ножницах с вращательным движением ножей.** Ножницы с вращательным движением ножей называются дисковыми ножницами. Ножи таких ножниц представляют два диска равного диаметра, которые при резке вращаются в разных направлениях с одинаковой окружной скоростью. Ножи устанавливают с перекрытием рабочих кромок на величину  $\Delta = (0,2 \dots 0,4)s$ , где  $s$  — толщина разрезаемого материала. На рис. 5.9 показана начальная стадия отрезки на дисковых ножницах.

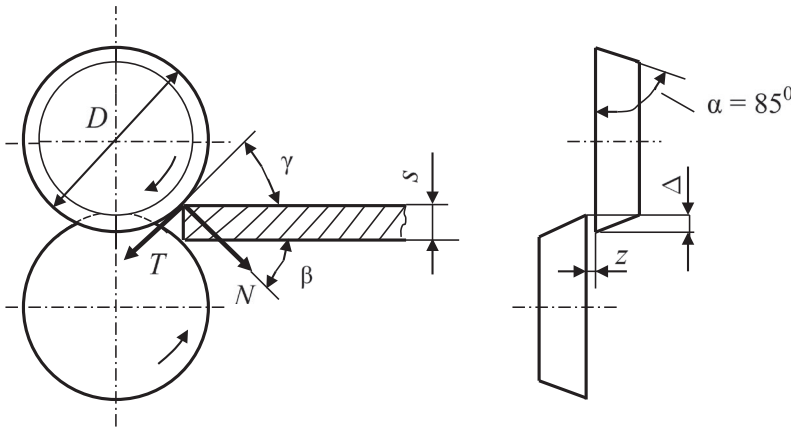


Рис. 5.9. Схема действия сил при отрезке на дисковых ножницах (параллельные ножи)

Особенность условий отрезки на дисковых ножницах заключается в том, что, для осуществления отрезки, ножи должны захватить материал и затем тянуть его.

В точках контакта с ножами на лист действует сила нормального давления  $N$  и сила трения  $T$ . Ножи захватывают лист в том случае, если удовлетворяется неравенство

$$2N \cos \beta < 2T \cos \gamma.$$

Приняв во внимание, что по закону Кулона  $T = \mu N$ , где  $\mu$  — коэффициент трения и угол  $\beta = 90^\circ - \gamma$ , получим

$$2N \sin \gamma < 2\mu N \cos \gamma,$$

откуда

$$\operatorname{tg} \gamma < \mu. \quad (5.7)$$

Таким образом, для захвата листа ножами, в начальной стадии отрезки необходимо, чтобы тангенс угла  $\gamma$  наклона касательной к контуру ножа в точке его контакта с листом был равен или меньше коэффициента трения  $\mu$  (при  $\mu = 0,2$ ,  $\alpha = 12^\circ$ ).

Условие захвата на установившейся стадии отрезки можно записать в функции параметров:  $s$  — толщины разрезаемого параметра;  $\Delta$  — величины перекрытия и  $R$  — радиуса ножа,

$$\mu \geq \left[ 1 / \left( 2\sqrt{R} \right) \left( \sqrt{\Delta + s} + \Delta \right) \right].$$

Из этой формулы можно определить минимальный диаметр дискового ножа, который обеспечивает захват листа при отрезке

$$2R = D_{\min} \geq \frac{\Delta + \sqrt{(\Delta + s)\Delta} + 0,5s}{\mu^2}. \quad (5.8)$$

Из данной формулы вытекает, что минимальный диаметр будет тем больше, чем больше толщина  $s$  разрезаемого металла и перекрытие ножей  $\Delta$  и чем меньше силы трения на контактной поверхности ножей и листа. Если значение перекрытия ножей  $\Delta$  изменяется в пределах  $(0,2 \dots 0,4)s$ , то согласно формуле (5.8) диаметр ножа, обеспечивающего захват, можно найти из соотношения

$$D \geq (1,0 \dots 1,2) \left( \frac{s^2}{\mu} \right). \quad (5.9)$$

Расчеты по формуле (5.9) показывают, что при коэффициенте трения  $\mu = 0,15$  захват листа будет происходить при  $D \geq (45 \dots 55)s$ , а при  $\mu = 0,20$  — при  $D \geq (25 \dots 30)s$ .

На практике установлено, что диаметр ножей, который обеспечивает захват разрезаемого листа, должен быть не менее  $(35 \dots 50)s$  при отрезке толстолистовой стали (толщиной более 4 мм) и не менее  $(25 \dots 30)s$  при отрезке тонколистовой стали, при этом угол захвата  $\alpha$  не должен превышать  $14^\circ$ .

Усилие резания на дисковых ножницах можно определить по формуле, аналогичной формуле (5.6) для гильотинных ножниц, заменив угол  $\gamma$  углом  $\alpha$

$$P = \frac{0,5k\sigma_{cp}s^2}{\operatorname{tg} \alpha}, \quad (5.10)$$

где  $\alpha$  — угол захвата. Используя условие (5.7), формулу (5.10) можно представить в функции параметров  $s$ ,  $\Delta$  и  $R$ :

$$P = \frac{k\sigma_{\text{ср}}s^2\sqrt{R}}{2\sqrt{s+\Delta}+\sqrt{\Delta}}. \quad (5.11)$$

Из формулы (5.11) следует, что усилие отрезки увеличивается с увеличением  $s$ ,  $\sigma_{\text{ср}}$  и  $R$  и уменьшается с увеличением  $\Delta$ .

Момент, необходимый для отрезки, равен произведению касательной силы  $T$  на радиус  $R$  или произведению усилия резания  $P$  на расстояние между прямой, совпадающей с направлением вектора силы, и линией, соединяющей центры вращения ножей,

$$M_{\text{кр}} = \left( \frac{PD}{2} \right) \sin \gamma. \quad (5.12)$$

Подставив в формулу (5.12) значение силы  $P$  согласно формуле (5.10), получим

$$M_{\text{кр}} = 0,125k\sigma_{\text{ср}}s^2D\cos\gamma.$$

Определив  $\cos\alpha$  в функции параметров  $s$ ,  $\Delta$  и  $R$ , можно выразить и момент кручения в функции этих параметров

$$M_{\text{кр}} = 0,125k\sigma_{\text{ср}}s^2(D - \Delta - s). \quad (5.13)$$

Если размерность  $\sigma_{\text{ср}}$  [МПа], а  $D$ ,  $\Delta$  и  $s$  [м], то  $M_{\text{кр}}$  [МН·м].

Анализ формулы (5.13) показывает, что  $M_{\text{кр}}$ , необходимый для вращения дисковых ножей, увеличивается с увеличением  $s$ ,  $\sigma_{\text{ср}}$ ,  $D$  и уменьшается с увеличением  $\Delta$ .

Зная величину  $M_{\text{кр}}$ , можно определить мощность электродвигателя  $N$ , необходимую для привода дисковых ножниц, по формуле

$$N = \frac{M_{\text{кр}}\pi n}{30\eta},$$

где  $M_{\text{кр}}$  — момент вращения;  $n$  — частота вращения ножей, об/мин;  $\eta$  — коэффициент полезного действия дисковых ножниц,  $\eta = 0,7...0,8$ . Если размерности  $M_{\text{кр}}$  [МН·м], а  $n$  [об/мин], то  $N$  [МВт].

Дисковые ножницы по количеству ножей подразделяются на парнодисковые и многодисковые. Парнодисковые ножницы бывают трех типов:

- с параллельным расположением ножей (осей);
- с одним наклонным диском;
- с двумя наклонными дисками (рис. 5.10).

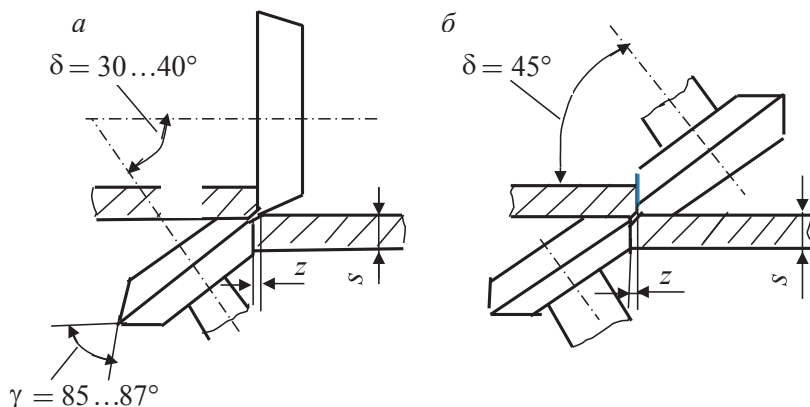


Рис. 5.10. Схема дисковых ножей с наклонными дисками:  
 а — с одним наклонным диском; б — с двумя наклонными дисками

Дисковые ножницы с параллельным расположением ножей применяются в основном для резки тонколистового металла; они имеют только одну пару ножей. Угол резания  $\alpha$  обычно составляет  $85^\circ$ , перекрытие ножей  $\Delta = (0,2 \dots 0,6)s$  и зазор между ножами  $z = (0,06 \dots 0,07)s$ .

Дисковые ножницы с углом резания  $90^\circ$  могут быть как двухдисковыми, так и многодисковыми (или многопарными). На многодисковых ножницах можно одновременно разрезать лист на несколько полос или лент одинаковой или разной ширины. Продольная отрезка широкорулонного проката на дисковых ножницах позволяет расширить область применения средств механизации и автоматизации в листоштамповочном производстве.

Для вырезки кругов и криволинейных контуров по разметке или по шаблону применяют однопарные дисковые ножницы с наклонно расположенными ножами (рис. 5.10). Ножницы с одним наклонным ножом применяют для вырезки заготовок с относительно большим радиусом скругления и малой толщиной листа. Угол наклона нижнего ножа  $\delta = 30 \dots 40^\circ$ , а угол резания  $\alpha = 85 \dots 87^\circ$ . Дисковые ножницы с двумя наклонными ножами применяют для вырезки контуров, ограниченных кривыми линиями, с относительно небольшим радиусом скругления.

У дисковых ножниц с наклонно расположенными ножами перекрытие ножей отсутствует, расстояние между кромками ножей по вертикали составляет  $0,25s$  и зазор между ножами больше оптимального  $z = (0,2 \dots 0,25)s$ . Это позволяет легко поворачивать лист относительно рабочих кромок ножей в процессе резки.



В зависимости от толщины разрезаемого материала дисковые ножи имеют диаметр 50–300 мм и толщину 20–90 мм. Дисковые ножи изготавливают из инструментальной стали марки У8А или ее заменителей. Твердость ножей после термообработки должна быть HRC 48–52. Рабочие плоскости ножей шлифуют, минимально допускаемая непараллельность этих плоскостей не должна превышать 0,02 мм на 300 мм диаметра ножа.

Дисковые ножницы используются также для обрезки неровного края деталей или полуфабрикатов, полученных вытяжкой из плоской заготовки, обладающей анизотропией механических свойств.

### 5.3. Вырубка и пробивка

#### 5.3.1. Технологичность деталей

Технологические процессы листовой штамповки могут быть рациональными лишь при условии создания технологической конструкции или формы детали, допускающей наиболее простое и экономичное изготовление.

Габаритные размеры плоских деталей (заготовок) из металлов, вырабатываемых в штампах, составляют от нескольких миллиметров до нескольких метров. Толщина этих деталей изменяется от 0,03–0,05 мм до 25 мм и выше. Верхний предел толщины и габаритных размеров деталей, получаемых вырубкой, ограничивается мощностью имеющегося на заводе парка оборудования (прессов) и размерами стола и ползуна прессы, а нижний предел — возможностью изготовления штампов.

Минимальная ширина детали или участка контура, получаемая вырубкой, должна быть больше  $1,5s$ . Если деталь узкая и длинная (ширина  $b$  меньше  $3s$ ), то такую деталь целесообразно получать расплющиванием проволочной заготовки с последующей обрезкой по контуру.

Радиус скругления  $R$  наружного контура при вырубке детали из полосы, ширина которой равна ширине  $b$  детали, находят из соотношения  $R \geq 0,6b$ , чтобы избежать образования выступов.

Минимальные размеры пробиваемых отверстий (рис. 5.11, в) зависят от их формы и механических свойств штампуемого материала. В табл. 5.1 приведены значения минимальных отверстий, пробиваемых в обычных штампах [8].

Выступы или пазы в вырубаемой детали (рис. 5.11, *a*) могут быть получены вырубкой, если их размеры больше следующих значений:

$$h \geq 1,2s; \quad b \geq (1,2 \dots 1,5)s,$$

где  $s$  — толщина вырубаемой детали.

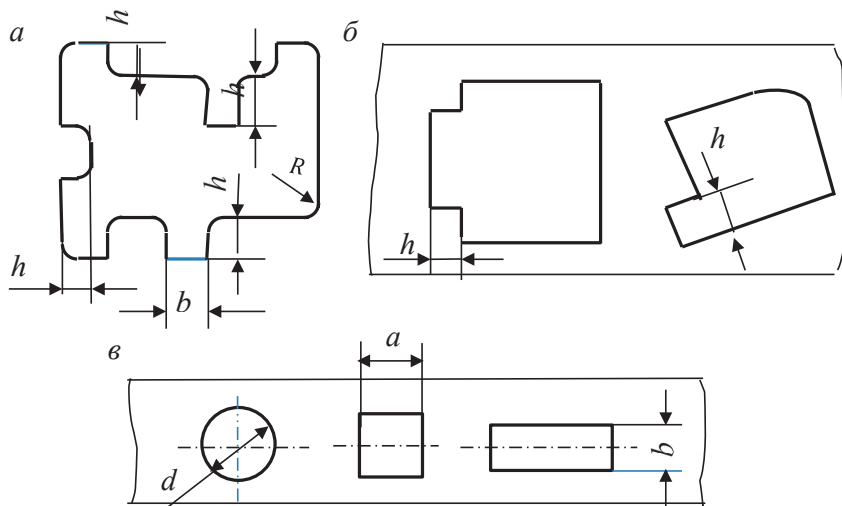


Рис. 5.11. Размер вырубаемых элементов деталей и пробиваемых отверстий:

$a$  — вырубленная деталь;  $б$  — вырубка деталей в ленте;  $в$  — пробивка отверстий

Таблица 5.1

Минимальные размеры отверстий, пробиваемых в обычных штампах, в долях от  $s$

Форма отверстия (см. рис. 5.11, в)	Материал детали							
	Сталь $\sigma_B$ , кг/мм <sup>2</sup>			Ла- тунь, медь	Алю- ми- ний	Титановые сплавы		
	>80	50—80	<50			при нагре- ве ВТ1—2, ВТ5	без на- грева ВТ1, ВТ5	без на- гре- ва ВТ4, ВТ6
Круглое $d$	1,5	1,2	1,0	0,8	0,7	0,75	1,75	1,0
Квадратное $a$	1,4	1,1	0,9	0,7	0,6	1,0	2,0	1,2
Прямоугольное $b$	1,2	0,9	0,7	0,6	0,5	1,2	2,0	1,2

При пробивке отверстий необходимо учитывать следующие положения:

- соотношение  $d > s$  справедливо только для быстроходных механических прессов, в которых пуансон подвергается ударной на-

грузке. При использовании гидравлических прессов можно брать меньше  $s$ ;

- используя специальные дыропробивные штампы, можно пробивать отверстия в твердой стали  $d = 0,5s$ , в мягкой стали и латуни  $d = 0,35s$ , алюминии  $d = 0,3s$ ;
- вибрационный способ пробивки отверстий позволяет производить пробивку отверстий  $d = (0,5...0,4)s$ ;
- если пробиваемое отверстие имеет уступы (см. рис. 5.11, б), то их высота должна быть больше толщины штампуемого материала, т. е.  $h \geq s$ . При меньших значениях  $h$  получить уступы пробивкой невозможно.

Расстояние между пробиваемыми отверстиями или между краем детали и отверстием (рис. 5.12) регламентируется формой отверстия, наружным контуром детали, толщиной и свойствами штампуемого материала.

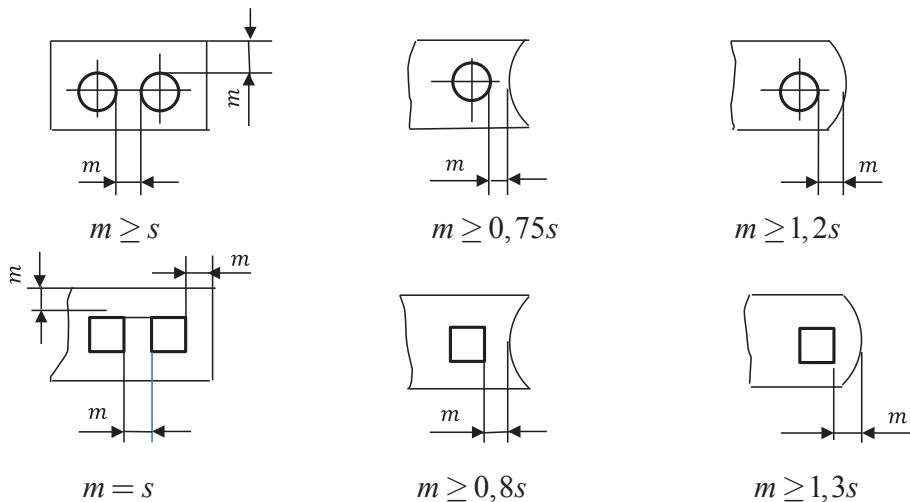


Рис. 5.12. Минимальное расстояние между отверстиями при пробивке в стальных деталях

Минимальные значения  $m$  перемычек, при которых можно использовать пробивку для стали, составляют  $(0,7...1,5)s$ .

Величина  $m$  перемычки между отверстиями, краем наружного контура детали и отверстиями определяет не только возможность пробивки, но и конструкцию штампа. Если размер  $m$  перемычки мал, то пробить одновременно несколько отверстий или контур и отверстия невозможно из-за недостаточной прочности матрицы. Детали с близ-

ко расположенными отверстиями в зависимости от условий производства штампуют на двух или нескольких штампах простого действия или на одном комбинированном штампе последовательного действия. В обоих случаях стоимость детали увеличивается за счет высокой стоимости штампов, а точность исполнения детали уменьшается.

Стороны вырубаемого контура или пробиваемого отверстия должны сопрягаться плавными кривыми с возможно большими радиусами  $R$ . Радиусы  $R$  сопряжения должны быть нормализованы, а их минимальные значения в долях толщины  $s$  должны удовлетворять данным табл. 5.2. Исключение из указанного правила составляют детали, получаемые безотходной штамповкой, или детали, контур (отверстие) которых вырубает (пробивают) составными пуансонами.

Таблица 5.2

Значения радиусов сопряжения при вырубке и пробивке

Материал	При вырубке контура		При пробивке	
	$\alpha > 90^\circ$	$\alpha < 90^\circ$	$\alpha > 90^\circ$	$\alpha < 90^\circ$
Сталь, латунь, алюминий	$0,3s$	$0,5s$	$0,4s$	$0,7s$
Титановый сплав с нагревом	$0,5s$	$0,7s$	$0,6s$	$0,8s$
Титановый сплав BT5, BT1-2	$1,5s$	$2,0s$	$1,75s$	$2,25s$
Титановый сплав BT1-1, BT5 без нагрева	$0,7s$	$0,9s$	$0,8s$	$1,0s$

*Примечание.*  $\alpha$  — угол между сопрягающимися сторонами;  $s$  — толщина штампуемой детали.

У вытянутых и изогнутых деталей, кроме сохранения минимальной перемычки между пробиваемыми отверстиями и между наружным контуром и отверстиями, необходимо выдержать определенное расстояние  $m_1$  между отверстиями и вертикальной стенкой детали, при котором исключалась бы возможность набега края отверстия на радиус сопряжения стенок (рис. 5.13), иначе пуансон при пробивке вследствие изгиба может сломаться или, наскочив на режущую кромку матрицы, вызвать выкрашивание рабочей кромки.

Минимальное расстояние от оси отверстия до вертикальной стенки  $m_1$  определяется по формулам:

- для изогнутых деталей

$$m_1 \geq r + \frac{d}{2};$$

- для вытянутых деталей

$$d < D - 2r,$$

где  $d$  — диаметр отверстия;  $D$  — диаметр детали;  $r$  — радиус сопряжения стенок.

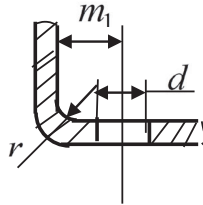


Рис. 5.13. Минимальное расстояние между отверстиями при пробивке и стенкой детали

Для увеличения срока службы штампа между переточками, а главное — для удешевления его изготовления, и для снижения стоимости штампуемых деталей, необходимо избегать в деталях резких переходов, узких и длинных открытых прорезей и обеспечивать получение минимального числа отходов.

При наличии острых углов на детали получить качественную поверхность среза невозможно. Если материал детали твердый, кончик угла у детали будет сорван, а если материал детали мягкий, на углах будет сильная утяжка.

При вырубке детали, имеющей отверстия, пробивать отверстия следует одновременно с получением наружного контура, используя для этой цели комбинированные штампы совмещенного действия.

### 5.3.2. Сущность процессов вырубки и пробивки. Очаг деформации

Вырубка служит для получения из листа деталей с наружным контуром, при пробивке получают отверстие в детали. Вырубку и пробивку производят в штампах, рабочими органами которых являются пуансон и матрица. Между пуансоном и матрицей устанавливается определенный зазор  $z$ .

Лист или полосу устанавливают на матрицу, имеющую острые кромки. Пуансон, также имеющий острые кромки, опускаясь вместе с верхней частью штампа, внедряется в лист. При этом, как и при отрезке

и разрезке, происходит относительное смещение металла листа в матрицу, которое заканчивается разрушением металла в зазоре, т. е. вырубкой или пробивкой. Отделенная часть листа проваливается в отверстие матрицы, а отход при ходе пуансона вверх снимается с пуансона съемником. Схема простейшего штампа для вырубки и пробивки представлена на рис. 5.14 [10].

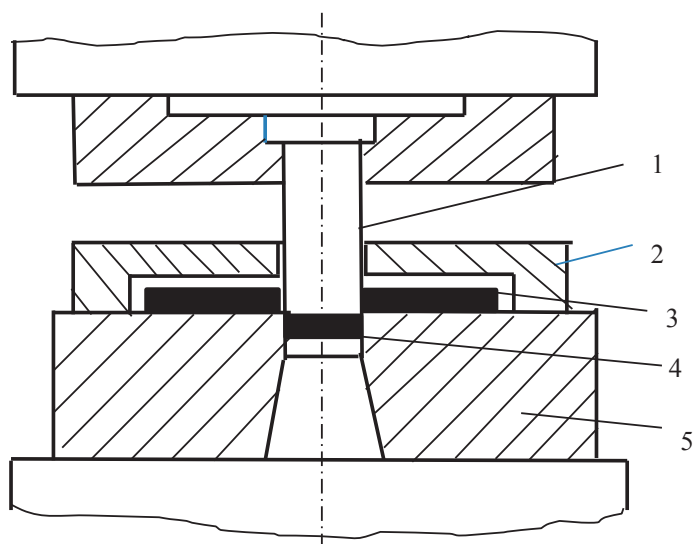


Рис. 5.14. Штамп для вырубки и пробивки:

1 — пуансон; 2 — съемник; 3 — лист (полоса); 4 — деталь в случае вырубки, отход в случае пробивки; 5 — матрица

Процесс вырубки (пробивки), как и процесс отрезки листовых материалов, состоит из трех последовательных стадий: упругой, пластической и разрушения (скалывания). Процесс начинается с упругой деформации, когда пуансон входит в соприкосновение с листом (заготовкой) и образуется поверхность контакта. На первой стадии, в момент внедрения пуансона в металл заготовки и вдавливания ее в отверстие матрицы, происходит изгиб поверхности заготовки около режущих кромок, потеря плоскостности детали вследствие действия изгибающих моментов, вызванных силами резания.

В дальнейшем, по мере внедрения пуансона в лист (заготовку), начинается стадия пластических деформаций со значительным изгибом и растяжением волокон металла (рис. 5.15). Металл пластически деформируется и упрочняется.

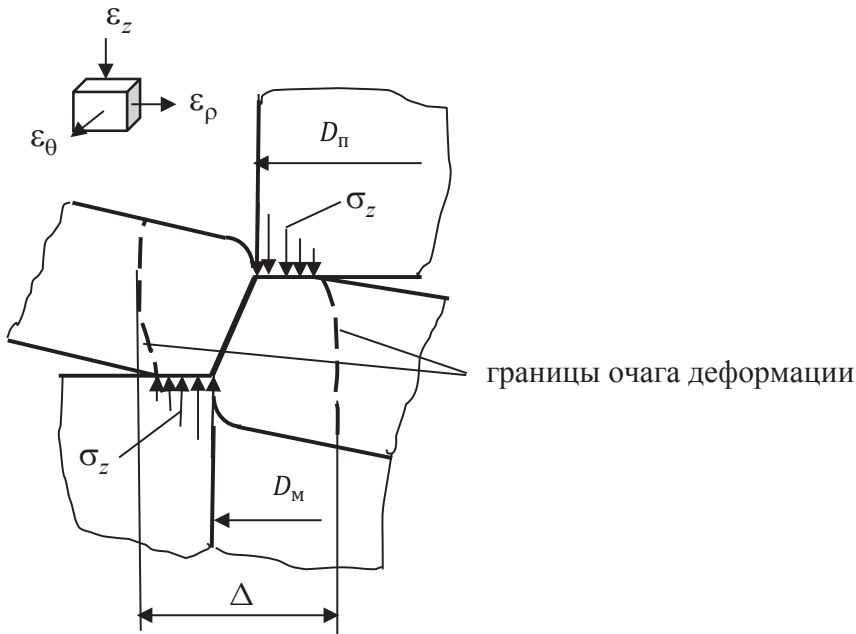


Рис. 5.15. Очаг деформации при вырубке и пробивке

Как и в случае резки, ширина зоны пластической деформации  $\Delta = (0,6 \dots 1,2)s$  зависит от свойств металла (чем пластичнее металл, тем шире зона пластических деформаций), от зазора  $z$  (увеличивается с ростом последнего), от степени притупления режущих кромок (увеличивается с ростом притупления) и от скорости деформирования (уменьшается с увеличением скорости деформирования).

В начале третьей стадии вдоль режущих кромок матрицы, а затем и пуансона в металле появляются микротрещины, далее — макротрещины, которые быстро растут в глубь металла. При нормальном зазоре эти трещины соединяются. При слиянии трещин процесс разделения металла заканчивается. Деталь отделяется от листа. Усилие вырубki (пробивки) резко падает. Отделение детали происходит прежде, чем пуансон проникнет в металл на полную его толщину.

Основной фактор, определяющий глубину внедрения пуансона, — жесткость материала, которая тем выше, чем больше твердость, предел прочности на срез и толщина металла. Более жесткий материал меньше изгибается, и глубина внедрения пуансона меньше. Отсюда относительная глубина внедрения пуансона  $h_B/s$  (отношение глубины внедрения пуансона к толщине металла) меньше при большой толщине,

чем при малой. При оптимальном зазоре изгиб металла незначителен, и поэтому мала глубина внедрения пуансона. Увеличение зазора, а также затупление режущих кромок вызывают увеличение глубины внедрения пуансона.

### 5.3.3. Оптимальный зазор

Зазор — это разность диаметральных размеров пуансона и отверстия матрицы. Удовлетворительное качество деталей обеспечивается правильными и равномерными зазорами и параллельностью режущих кромок.

Ранее, при рассмотрении механизма деформирования при разрезке, было показано, что для улучшения качества поверхности среза желательно принимать такие значения зазора, при которых трещины, идущие от режущих кромок пуансона и матрицы, встречаются своими вершинами, образуя единую поверхность. Уравнение (5.5), определяющее условия оптимального зазора, справедливо и для вырубки (пробивки).

При зазоре меньше оптимального  $z < z_{\text{опт}}$ , скалывающие трещины не совпадают. Материал, находящийся между трещинами в конце рабочего хода пуансона, разрушается. При этом образуются два или несколько блестящих поясков, разделенных между собой зонами скалывания. Эти пояски ухудшают качество поверхности раздела и являются концентраторами напряжений. При малом зазоре возрастает концентрация нормальных напряжений у рабочих кромок пуансона и матрицы. Это вызывает быстрое затупление рабочих кромок и, следовательно, снижение стойкости.

С уменьшением зазора (по сравнению с оптимальным) изгибающий момент уменьшается. При этом растягивающие напряжения, действующие в металле в радиальном направлении, уменьшаются и почти не оказывают влияния на упругие деформации вырубаемой заготовки (детали). Однако в таком случае растут в заготовке напряжения сжатия, в результате чего после вырубки возникают обратные по знаку растягивающие упругие деформации. Эти деформации приводят к увеличению диаметра вырубленной детали и к уменьшению пробитого отверстия, тогда деталь остается в матрице, а отход плотно охватывает пуансон.

При значительном зазоре, большем по сравнению с оптимальным зазором  $z > z_{\text{опт}}$ , трещины скалывания выходят на свободные поверх-



ности листа на некотором удалении от режущих кромок инструмента и образуют заусенец. При большом зазоре происходит увеличение растяжения и изгиба металла заготовки. Это приводит к потере плоскостности детали, искажению ее формы при вырубке. Кроме того, в этом случае на материале возникают утяжины, образующиеся у свободных поверхностей вблизи поверхности среза, которые также искажают форму заготовки при вырубке.

При выборе зазора, кроме качества поверхности среза, необходимо еще учитывать желаемую стойкость инструмента, на которую существенное влияние оказывает зазор, а также требования, предъявляемые к параметрам точности штампуемой детали. Величина оптимального зазора зависит от механических свойств материала заготовки, скорости деформирования, а также условий нагружения поверхностей заготовки вблизи поверхности среза и от размеров и формы деталей (отверстия). Отсюда выбор рациональных зазоров между пуансоном и матрицей при вырубке (пробивке) является многофакторной задачей с несколькими критериями оптимизации.

На практике оптимальный зазор при вырубке (пробивке) определяется по специальным таблицам, составленным на основании обобщения практических данных. Такие таблицы приводятся в справочниках, посвященных листовой штамповке.

При толщине металла 0,3–20,0 мм (табл. 5.3) оптимальный зазор изменяется в пределах 5–12 % от толщины листа (меньшие значения относятся к меньшей толщине, большие — к большей).

Таблица 5.3

**Двусторонние зазоры разделительных штампов, % от толщины  $s$  материала**

$s$ , мм	Металлы при $\sigma_B$ , МПа				Неметаллические материалы	
	До 200	200–400	400–600	Свыше 600 и закаленные до HRC 45–50	Фибра, текстолит, гетинакс	Картон, бумага, асбест
0,1–0,5	3–5	5–7	7–9	10–12	1–2	0,5–1
0,6–0,8	4–6	6–8	8–10	11–13	2–3	0,5–1
1,0–1,5	4–6	6–8	8–10	11–13	2–3	1–2
1,8–2,0	5–7	7–9	9–11	12–14	2–3	1–2
2,0–3,0	5–7	7–9	9–11	12–14	3–4	1–2
3,5–5,0	7–10	9–12	11–14	14–16	3–4	1–2
6,0–10	10–13	12–15	14–17	17–20	3–4	1–2
11–16	13–16	15–18	17–20	20–23	3–4	1–2

Экспериментальные данные показывают, что при определении оптимального технологического зазора необходимо различать первый и второй оптимальные зазоры. Первый оптимальный зазор обеспечивает получение высококачественных деталей при высоких силовых и энергетических затратах на разделение штампуемого металла. При этом стойкость штампов будет пониженной. Второй оптимальный зазор обеспечивает получение деталей хорошего качества при минимальных или умеренных силовых и энергетических затратах на разделение металла. При этом стойкость штампового инструмента будет максимальной.

Оптимальный односторонний технологический зазор в разделительных операциях листовой штамповки для тонколистовых материалов можно определить по эмпирической формуле [8]

$$z_0 = 0,32KK_v s \sqrt{\sigma_{cp}},$$

где  $z_0$  — односторонний зазор;  $K$  — коэффициент, определяющий вид оптимального зазора (первый или второй оптимальный зазор);  $K_v$  — коэффициент, учитывающий влияние скорости деформирования  $v_d$ ;  $s$  — толщина металла;  $\sigma_{cp}$  — сопротивление срезу, МПа.

Для получения высококачественных деталей из тонколистовых материалов при определении первого оптимального зазора  $K = 0,005$ . При определении второго оптимального зазора следует учитывать, что коэффициент  $K$  различен для каждого материала. Так, для меди  $K = 0,015$ , для латуни Л63 М  $K = 0,022$ .

Значение коэффициента  $K_v$  зависит от скорости деформирования и от материала. Так, при  $v_d \leq 10$  см/с для различных материалов  $K_v = 1,0$ ; при  $v_d \leq 10 \dots 30$  см/с коэффициент  $K_v$  у каждого материала свой: для меди М3 ( $s = 1,85$  мм)  $K_v = 1,02$ , а для латуни Л63 М ( $s = 1,5$  мм)  $K_v = 1,07$ . Сопротивление срезу  $\sigma_{cp}$  при одностороннем зазоре  $z_0 = 7,5\%$  можно определить по эмпирической формуле

$$\sigma_{cp} = \left( \frac{1,2s}{d + 0,6} \right) \sigma_B \approx \left( 1 + \frac{2s}{d} \right) \sigma_T,$$

где  $\sigma_B$  — временное сопротивление;  $\sigma_T$  — предел текучести при растяжении.

#### 5.3.4. Энергосиловые характеристики процесса вырубки и пробивки

К энергосиловым характеристикам процесса вырубки и пробивки относятся:

- усилие вырубки и пробивки;
- усилие проталкивания определенной части через рабочее отверстие матрицы;
- усилие съема отхода (или изделия) с пуансона;
- работа деформирования.

**Усилие вырубки (пробивки).** Усилие вырубки (пробивки) — деформирующее усилие, зависит от следующих факторов [7]:

- сопротивления материала заготовки срезу  $\sigma_{\text{ср}}$ ;
- толщины материала  $s$ ;
- длины отделяемого контура;
- формы и состояния рабочих кромок пуансона и матрицы;
- зазора между пуансоном и матрицей;
- скорости деформирования;
- глубины проникновения (внедрения) пуансона в металл в момент возникновения скалывающей трещины.

При расчете усилие вырубки и пробивки приближенно определяют как произведение площади боковой поверхности  $F$ , отделяемой части металла, на сопротивление срезу  $\sigma_{\text{ср}}$ . Однако действительные значения толщины листового металла отличаются от номинальных и допуск на толщину может составлять 5–10 % от номинального значения. Кроме того, по мере притупления режущих кромок, усилие деформирования несколько увеличивается. Влияние этих факторов на усилие может быть учтено путем введения коэффициента  $k = 1,1 \dots 1,3$ .

Формула для определения усилия деформирования с учетом последнего замечания принимает вид

$$P = kF\sigma_{\text{ср}} = kLs\sigma_{\text{ср}}.$$

Из формулы следует, что максимальное усилие возникает в начале вырубки и при пробивке, когда площадь  $F$  максимальна.

В реальных условиях деформирования усилие вырубки, как это показано на рис. 5.16, изменяется от нуля в самом начале процесса до максимума, а затем уменьшается в момент появления скалывающих трещин.

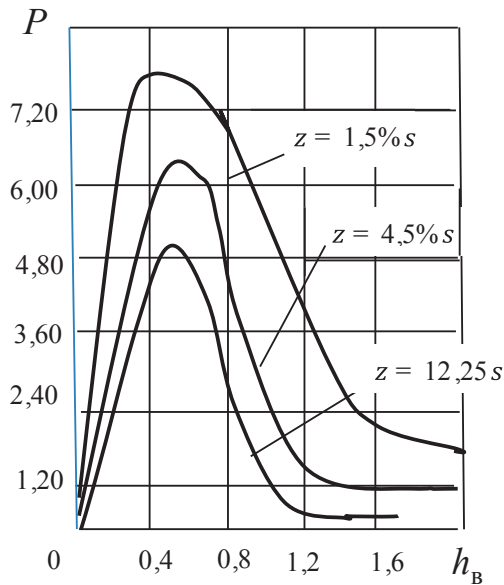


Рис. 5.16. Изменение усилий вырубке (пробивки) стали 08 кп с  $s = 2$  мм в зависимости от глубины внедрения  $h_{\text{в}}$  пуансона при различном технологическом зазоре  $z$  (скорость деформирования  $275 \text{ мин}^{-1}$ )

Если принять допущение о том, что по поверхности раздела происходит чистый сдвиг, а радиальная деформация  $\epsilon_r$  равномерно распределена по толщине заготовки и направление главных осей деформации в процессе деформирования остается неизменным, то формула для определения усилия вырубке и пробивки (до момента появления скалывающих напряжений) может быть представлена в виде [8]

$$P_x = L(s - x)\tau_s,$$

где  $x$  — глубина внедрения пуансона в металл;  $\tau_s$  — наибольшее касательное напряжение,  $\tau_s = 0,58\sigma_s$ .

Необходимо отметить, что при холодной вырубке и пробивке происходит деформационное упрочнение металла. При этом напряжение текучести увеличивается с увеличением степени деформации.

Если считать, что изменение  $\sigma_s$  вследствие упрочнения происходит согласно степенной зависимости, предложенной С. И. Губкиным [5],

$$\sigma_s = \frac{\sigma_{\text{в}}}{1 - \psi_p} \left( \frac{\psi}{\psi_p} \right)^{\frac{\psi_p}{1 - \psi_p}},$$

где  $\sigma_B$  — временное сопротивление;  $\psi_p$  — относительное уменьшение площади поперечного сечения образца до начала образования шейки при испытании на растяжение;  $\psi$  — степень деформации, эквивалентная по упрочняющему эффекту, относительному изменению площади сечения заготовки в процессе деформирования,

$$\psi = \frac{F_0 - F_x}{F_0} = \frac{sL - (s - x)L}{sL} = \frac{x}{s}.$$

Здесь  $x$  — глубина внедрения режущей кромки в заготовку;  $s$  — толщина заготовки, то усилие деформирования при вырубке (пробивке) с учетом упрочнения металла может быть определено по формуле

$$P_x = \frac{0,58\sigma_B}{2(1 - \psi_p)} \left( \frac{x}{s\psi_p} \right)^{\frac{\psi_p}{1 - \psi_p}} (s - x)L, \quad (5.14)$$

где  $L$  — длина линии реза.

Из формулы (5.14) следует, что теоретически  $P = 0$  при  $x = 0$  и при  $x = s$ . Значит, функция  $P = f(x)$  имеет максимум. Определить величину  $x_1$ , соответствующую максимальному усилию, можно из условия  $dP/dx = 0$ . Выполняя дифференцирование, находим, что  $x_1 = s\psi_{ш}$ . Подставив  $x = x_1$  в формулу (5.14), получаем

$$P_{\max} = 0,58\sigma_B sL.$$

Учитывая, что для малоуглеродистых листовых сталей  $\sigma_{cp} = 0,7\sigma_B$ , имеем

$$P_{\max} = 0,83\sigma_B sL. \quad (5.15)$$

Формула (5.15) является приближенной вследствие того, что условие постоянства  $\tau_s$  по площади среза не учитывает неравномерность деформаций по толщине заготовки, а также предполагает постоянство направления главных осей напряжений в процессе деформирования. По формуле сопротивление срезу  $\sigma_{cp} = 0,5\sigma_B$ , что несколько отличается от действительного значения. Более точные значения  $\sigma_{cp}$ , найденные экспериментально, приведены в справочниках.

При зазоре, меньшем оптимального, когда трещины не встречаются и образуются пояски вторичного среза, усилие снижается ступенчато, рывками, обеспечивая срезание перемычек, остающихся меж-

ду трещинами. Таким образом, при зазоре, меньшем оптимального, максимальное усилие увеличивается незначительно, но существенно возрастает работа деформирования, а кроме того, вследствие заклинивания перемычек между трещинами, существенно возрастают напряжения, действующие на боковые поверхности режущего инструмента, что приводит к их повышенному износу.

**Усилие проталкивания и съема.** При вырубке с малым зазором деталь (или заготовка) остается в матрице, а отход плотно охватывает пуансон. В результате упругих деформаций на поверхностях раздела матрица и пуансона с металлом заготовки возникают контактные напряжения  $\sigma_{\text{км}}$  и  $\sigma_{\text{кп}}$ , которые при проталкивании детали сквозь матрицу и при съеме отхода с пуансона вызывают возникновение напряжений трения. В связи с этим при рабочем ходе пуансону необходимо преодолеть не только сопротивление вырубке — пробивке  $P_{\text{в}}$ , но и сопротивление сил трения  $T_{\text{м}}$ , которые возникают при перемещении детали относительно матрицы, а также сил трения  $T_{\text{п}}$ , возникающих на контактной поверхности пуансона и отхода металла, как показано на рис. 5.17.

$$P = P_{\text{в}} + T_{\text{м}} + T_{\text{п}}.$$

При обратном ходе преодолевается только сопротивление трения съему металла с пуансона. Систему сил  $T_{\text{м}}$  и  $T_{\text{п}}$  называют усилием проталкивания  $P_{\text{пр}} = T_{\text{м}} + T_{\text{п}}$ , а силу  $T_{\text{п}}$  — усилием съема,  $P_{\text{см}} = T_{\text{п}}$ .

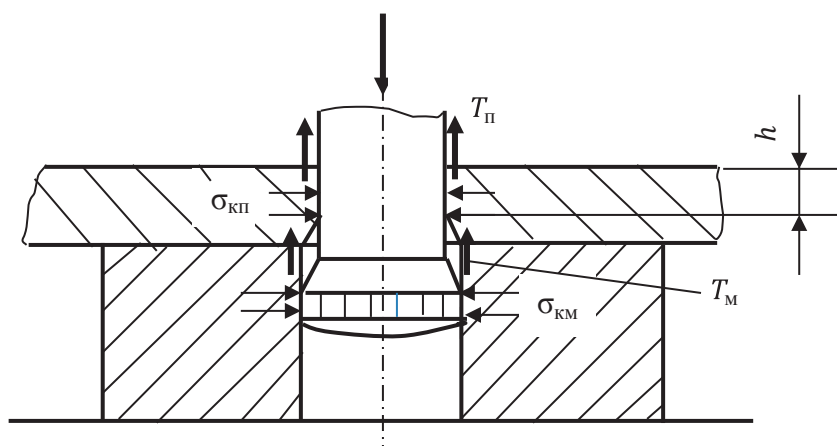


Рис. 5.17. Схема действия сил трения  $T_{\text{м}}$  и  $T_{\text{п}}$

Определение усилий проталкивания и съема позволяет уточнить энергосиловые характеристики вырубки (пробивки), а также получить необходимые данные для расчета на прочность и жесткость отдельных деталей штампа (съемники, пружины, пуансонодержатели и детали их крепления и пр.).

Если считать, что отход металла соприкасается с пуансоном только блестящим пояском высотой  $h$ , то формула для определения усилия съема будет иметь вид

$$P = \mu \sigma_{\text{кп}} Lh.$$

Для верхней оценки усилия съема можно принять  $h = 0,3s$ ;  $\mu = 0,2$  и  $\sigma_{\text{рп}} \approx \sigma_{\text{ср}}$ , тогда получаем

$$P_{\text{см}} = 0,06 Ls \sigma_{\text{ср}} = 0,06 P.$$

Для принятых условий деформирования усилие съема составляет 6 % от технологического усилия вырубки (пробивки).

Если силы трения, приложенные к поверхности контакта пуансона и отхода металла, равны силам трения, приложенным к поверхности контакта вырубленной детали и матрицы ( $T_{\text{п}} = T_{\text{м}}$ ), то усилие проталкивания равно удвоенному усилию съема

$$P_{\text{пр}} = 2P_{\text{см}}.$$

Однако, вследствие даже незначительного изгиба отдельной части металла, нормальные напряжения  $\sigma_{\text{кп}}$ , приложенные к поверхности контакта пуансона и металла, во время съема могут увеличиваться. Также может возрасти высота площадки контакта. Все это приведет к некоторому увеличению усилия съема по сравнению с долей усилия проталкивания. Таким образом, можно записать, что

$$P_{\text{пр}} \cong P_{\text{см}}.$$

Кроме рассмотренных факторов, на усилие проталкивания и съема существенно влияют: ширина перемычки между соседними отделяемыми контурами (чем она больше, тем усилие проталкивания и съема больше); форма и размеры штампуемого контура; зазор между пуансоном и матрицей; возможность перекоса отхода металла относительно пуансона и пр. Поскольку учет влияния всех этих факторов представляет определенные трудности, усилие проталкивания и съема опреде-

ляют, используя экспериментальные данные, полученные в функции усилия вырубки (пробивки) по следующим эмпирическим формулам:

$$P_{\text{пр}} = k_{\text{пр}} P = k_{\text{пр}} P \left( \frac{h}{s} \right),$$

$$P_{\text{см}} = k_{\text{см}} P,$$

где  $k_{\text{пр}}$  и  $k_{\text{см}}$  — коэффициенты (или относительные усилия) проталкивания и съема.

В зависимости от толщины металла, числа одновременно вырубаемых деталей и типа штампа (простого или последовательного действия),  $k_{\text{пр}}$  изменяется в пределах 0,05–0,14, а  $k_{\text{см}}$  — 0,02–0,20 [5].

**Работа деформирования.** Работа деформирования при вырубки (пробивке) может быть вычислена, если известна площадь, ограниченная кривой рабочей нагрузки (диаграммы),  $P = f(x)$  или известен коэффициент заполнения кривой рабочей нагрузки  $\lambda$ , называемый также коэффициентом полноты диаграммы и определяемый с помощью соотношения

$$\lambda = \frac{F_{\text{д}}}{P_{\text{max}} h^*},$$

где  $F_{\text{д}}$  — площадь под кривой изменения усилия по пути;  $h^*$  — значения хода до разрушения.

Величина коэффициента  $\lambda$  зависит от рода металла, его свойств и толщины листа (полосы) и в зависимости от этих характеристик изменяется в пределах 0,15–0,8. Чем тверже металл, тем значение  $\lambda$  меньше. Значения  $\lambda$  для различных материалов в зависимости от толщины обрабатываемого металла приведены в табл. 5.4. Для других условий вырубки (пробивки) значения  $\lambda$  приводятся в справочной литературе по технологии холодной штамповки.

Таким образом, работа деформирования может быть определена по формуле

$$A_{\text{д}} = \lambda k \sigma_{\text{ср}} F_{\text{ср}} h,$$

где  $h$  — ход режущих кромок;  $F_{\text{ср}}$  — усредненная площадь диаграммы.

При зазоре меньшем нормального, когда появляются пояски вторичного среза, работа деформирования существенно увеличивается. Работа деформирования также возрастает по мере притупления режущих кромок, что необходимо учитывать при подборе оборудования.



Таблица 5.4

**Значения коэффициента полноты диаграммы  $\lambda$**   
**(коэффициента заполнения кривой рабочей нагрузки)**

Материал	Толщина материала, мм			
	до 1	1–2	2–4	свыше 4
Сталь мягкая $\sigma_{ср} = 250...350$ МПа	0,70–0,65	0,65–0,60	0,60–0,50	0,45–0,30
Сталь средней твердости $\sigma_{ср} = 350...500$ МПа	0,60–0,55	0,55–0,50	0,50–0,42	0,40–0,30
Твердая сталь $\sigma_{ср} = 500...750$ МПа	0,45–0,40	0,40–0,35	0,35–0,30	0,30–0,15
Al, Cu	0,75–0,70	0,70–0,65	0,65–0,55	0,50–0,40

### 5.3.5. Способы уменьшения деформирующего усилия

Для уменьшения деформирующего усилия при вырубке (пробивке) применяют различные способы [9]:

- вырубку контура по частям;
- вырубку (пробивку) пуансонами разной длины со ступенчатым расположением рабочих кромок;
- вырубку (пробивку) при помощи пуансонов и матриц с наклонными (скошенными рабочими кромками).

Вырубка пуансонами и матрицами со скошенными режущими кромками (рис. 5.18) позволяет кроме уменьшения усилия обеспечить плавную работу пресса и снизить шум во время вырубки, поскольку процесс вырубки (пробивки) в этом случае осуществляется постепенно, а не одновременно по всему контуру. В результате усилие вырубки (пробивки) может быть уменьшено на 30–40 %. Скосы выполняют симметричными относительно оси инструмента.

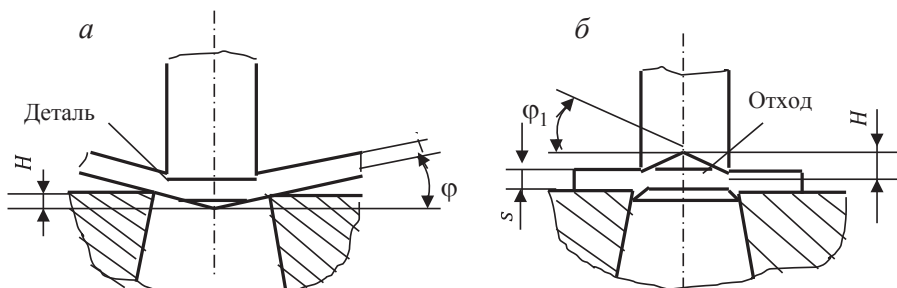


Рис. 5.18. Вырубка матрицей со скошенной кромкой (а) и пробивка пуансоном со скошенной кромкой (б)

Применение скосов вызывает прогиб той части металла, которая соприкасается с инструментом, имеющим наклонные режущие кромки. Поэтому при вырубке скосы делаются на матрице, а при пробивке — на пуансоне.

Высота скосов  $H = (1...3)s$ , а угол скоса  $\varphi = (3...8)^\circ$ . При вырубке круглой заготовки в матрице с двусторонним скосом (рис. 5.18, а) формулы для определения усилия вырубки (пробивки) имеют вид:

- при высоте скоса  $H$ , равной толщине металла,

$$P = \frac{2}{3} \pi d s \sigma_{\text{cp}};$$

- при высоте скоса  $H$ , находящейся в пределах 0,5–1,0 толщины металла,

$$P = 2 s d \sigma_{\text{cp}} \arccos \frac{H - 0,5s}{H}.$$

При пробивке прямоугольного отверстия с размерами  $b \times c$  пуансоном с двусторонними скосами (рис. 5.18, б), формулы для определения усилия имеют вид:

- при высоте скоса  $H$ , равной толщине металла,

$$P = 2 s \sigma_{\text{cp}} (b + 0,5c);$$

- при высоте скосов  $H$  больше толщины металла

$$P = 2 s \sigma_{\text{cp}} \left( b + \frac{0,5s}{H} \right).$$

При вырубке и пробивке деталей или заготовок диаметром свыше 250–300 мм из толстолистого металла ( $\frac{s}{D} > 0,1$ ), скосы предусматривают, как правило, на рабочих кромках матрицы. Число скосов (в виде повторяющихся волн) зависит от размеров матрицы, их может быть 4 и более. Относительная высота скосов  $H/s$  изменяется в пределах 1–3: чем толще металл, тем относительная высота скоса меньше.

Для снижения усилия при многопуансонной вырубке и пробивке применяют пуансоны разной высоты. Разность высот пуансонов составляет  $(0,6...0,8)s$ .

При пробивке близко расположенных отверстий, центральные пуансоны должны быть короче остальных наполовину толщины листа.

### 5.3.6. Точность и качество поверхности среза при вырубке и пробивке

Точность при вырубке по наружному контуру и пробивке отверстий зависит [5]:

- от конфигурации и размера вырубаемой детали;
- конфигурации и размера пробиваемого отверстия;
- толщины материала заготовки;
- свойств и состояния материала;
- анизотропии материала;
- точности изготовления рабочих, фиксирующих и направляющих деталей штампа.

Для вырубки деталей обычной точности, величина допусков на приготовление рабочих частей штампа принимается по 3-му классу, иногда по 2-му классу точности.

В результате неравномерных напряжений в материале штампуемой детали, последние получаются не плоскими, а выпуклыми в сторону матрицы. Этот дефект частично устраняется применением в штампе прижима.

В результате анизотропии свойств листового материала вдоль и поперек направления проката, геометрическая форма вырубленной детали искажается. Особенно это проявляется при штамповке крупногабаритных деталей. При этом, при вырубке деталей из отожженных листов, форма искажается меньше, чем при вырубке из наклепанного металла.

В результате упругих деформаций, возникающих в детали при штамповке, размеры отштампованной детали отличаются от фактических размеров матрицы, а после пробивки размеры отверстий отличаются от размеров рабочей части пуансонов. Величина упругих деформаций зависит:

- от зазора между пуансоном и матрицей — с увеличением зазора размеры вырубленной детали уменьшаются, а размеры пробитого отверстия увеличиваются, и наоборот;
- свойств материала заготовки — чем пластичнее материал, тем меньше абсолютные значения упругих деформаций и больше абсолютные значения остаточных деформаций;
- линейных размеров штампуемой детали — при увеличении линейных размеров детали, абсолютные значения упругих деформаций возрастают;

- расположения отверстий при пробивке их в предварительно вырубленной заготовке; если отверстия расположены от края заготовки на расстоянии менее двух-трех толщин материала, контур детали и отверстия будут искажены;
- толщины материала — с увеличением толщины, при всех прочих равных условиях, максимальные значения упругих деформации уменьшаются, а остаточные значения увеличиваются.

Точность размеров штампуемых изделий при вырубке и пробивке обеспечивается правильным назначением допусков на изготовление рабочих частей инструмента с учетом перечисленных выше факторов и точностью изготовлением инструмента.

К погрешностям формы вырубаемых деталей следует отнести погрешность профиля поверхности среза.

Поверхность среза при толщине более 1 мм имеет следующие отчетливо выраженные области: закругление, блестящий поясok и зону скалывания.

Профиль вырубленной детали из материала толщиной  $s$  при нормальном зазоре показан на рис. 5.19. Наибольший размер детали  $d_m$  соответствует размеру матрицы, наименьший размер  $d_n$  — размеру пуансона. По контуру среза детали со стороны образуется закругление высотой  $h_y$ , особенно заметное на толстых материалах. Высота утяжки  $h_y$  зависит от усилия вырубki, формы вырубаемого контура и зазора между пуансоном и матрицей. Высота блестящего пояска —  $h_n$ . Шероховатость его поверхности составляет 1,6–10 мкм. Шероховатость поверхности части детали на высоте  $h_c$ , отделившейся в результате разрушения материала, — 20–40 мкм. Угол скола  $\alpha$  при нормальном зазоре увеличивается с уменьшением толщины металла, уменьшается с увеличением напряжения среза  $\sigma_{cp}$ . Высота заусенца  $h_3$ .

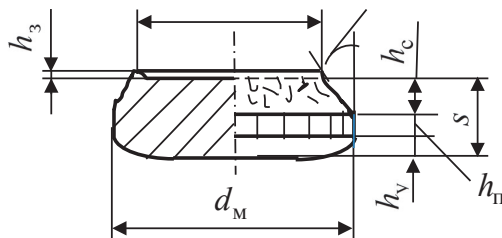


Рис. 5.19. Профиль вырубленной детали

При внедрении пуансона в полосу, металл растягивается и в месте зазора в нем образуется упрочненная зона. Соппротивление упрочненной зоны образованию трещин приводит к тому, что даже при острых режущих кромках металл разрушается не по режущим кромкам, а на некотором расстоянии от них. Часть упрочненной зоны остается в виде заусенцев. Высота заусенца  $h_3$  увеличивается по мере затупления режущих кромок и увеличения зазоров между пуансоном и матрицей. При затупленном пуансоне образование заусенца происходит на вырубленной детали. Форма поверхности среза на отходе (в полосе) после вырубки имеет вид, обратный виду вырубленной детали: со стороны пуансона образуется закругление, а со стороны матрицы — острая кромка. При затуплении матрицы, на отходе вокруг отверстия образуется заусенец.

При вырубке тупыми пуансоном и матрицей, заусенец образуется как на детали, так и на отходе. По высоте заусенцев судят о степени износа пуансона и матрицы, а также о качестве вырубленных деталей. На высоту заусенца  $h_3$  оказывает влияние и конструкция матрицы. При вырубке в матрице с цилиндрическим провальным окном, высота заусенца меньше, чем при вырубке в матрице с коническим провальным окном.

Качество поверхности разделения оценивается по показателям ее геометрических несовершенств и показателям микрогеометрии [7]. Геометрические несовершенства оцениваются по следующим коэффициентам: утяжки  $k_y = h_y/s$ ; блестящего пояса  $k_n = h_n/s$ , скола  $k_c = h_c/s$ ; непрямолинейности  $k_x = x/s$ ; коэффициенту  $k_\alpha = \operatorname{tg} \alpha = x/h_c$  и высоте заусенца  $h_3$ .

Геометрические несовершенства поверхности раздела — и более высокое качество деталей (наиболее благоприятный профиль поверхности разделения) характеризуются сравнительно большим коэффициентом  $k_n$  и сравнительно малыми коэффициентами  $k_y$ ,  $k_c$ ,  $k_x$  и  $k_\alpha$ . На основе принципа объединения коэффициентов  $k_y$ ,  $k_c$ ,  $k_x$  и  $k_\alpha$  в соответствии с их числовыми значениями можно классифицировать характер поверхности разделения по классам геометрических несовершенств отдельно для пластичных и малопластичных материалов. Для последовательного измерения геометрических параметров профиля поверхности разработан универсальный прибор. Примеры классификации поверхности разделения по классам геометрических несовершенств деталей, вырубленных из разных материалов, приводятся

в справочниках. Наличие такой классификации позволяет при разработке технологического процесса штамповки, исходя из требований, предлагаемых к деталям данного вида производства, решить вопрос, к какому классу геометрических несовершенств поверхности разделения отнести ту или иную деталь. Это определяет себестоимость изготовления штамповой оснастки, а следовательно, и себестоимость изготовления деталей.

Основной составной частью поверхности разделения, которая определяет ее качество, является высота  $h_{\text{п}}$  блестящего пояска, т. к. эта поверхность участвует в сопряжении с другими деталями и контролируется по размерам. Величина  $h_{\text{п}}$  зависит от пластичности металла, толщины заготовки, технологического зазора и скорости деформирования (числа ходов пресса).

Основными параметрами, определяющими качество поверхности среза, являются:

- конструкция и состояние штампов, особенно их рабочих частей; шероховатость поверхности рабочих частей штампа при вырубке и пробивке деталей толщиной до 1 мм рекомендуется по 8–9-му классу, а для деталей толщиной свыше 1 мм — по 6–7-му классу чистоты;
- величина и равномерность зазора между пуансоном и матрицей; при нормальном зазоре, но затупленных кромках режущих частей инструмента, качество поверхности ухудшается из-за появления заусенцев по контуру деталей или отверстий;
- физико-механические характеристики материала — с повышением пластичности качество поверхности ухудшается; плохое качество поверхности получается при вырубке и пробивке титановых сплавов, нержавеющей аустенитных сталей и материалов, склонных к наволакиванию;
- число ходов пресса — работа на прессе с числом ходов 400 и выше при вырубке деталей из материала толщиной до 1 мм сопровождается улучшением шероховатости поверхности среза;
- правильный выбор смазки — влияет на качество изготавливаемых деталей и срок службы штампов при вырубке и пробивке. Особенно большое значение смазка имеет при вырубке деталей из нержавеющей и электротехнических сталей, фосфорной бронзы; при вырубке и пробивке из этих материалов следует смазывать поступающий материал. Вырубку и пробивку деталей из хромони-

келевых сталей рекомендуется производить со смазкой вязким сульфидированным маслом.

Шероховатость поверхности среза при вырубке и пробивке находится обычно в пределах 5–6-го класса, а при отрезке и надрезке — 3–5 — классов чистоты (ГОСТ 2789–59).

### 5.3.7. Основные виды брака при вырубке и пробивке

При вырубке и пробивке на поверхности среза штампуемой детали получают заусенцы или неровный (рваный) срез, распределенный неравномерно по всей поверхности [7]. Причины такого брака:

- режущие кромки пуансона и матрицы в результате износа затупились;
- рабочие кромки матрицы с цилиндрическим пояском имеют конус со стороны входа пуансона в матрицу (обратный конус у рабочей части матрицы);
- зазор между пуансоном и матрицей больше или меньше оптимального для данной марки и толщины штампуемого материала.

Если режущая кромка пуансона затуплена, при вырубке заусенец получается на детали, а при пробивке — на отходе. На отходе же при вырубке, а на детали при пробивке будет рваный край.

Если затуплены режущие кромки пуансона и матрицы, то заусенцы во всех случаях будут на детали и отходе. Высота заусенца зависит от степени затупления режущих кромок: чем больше затупление, тем выше заусенец.

Длительность сохранения режущих кромок у пуансона и матрицы при всех равных условиях зависит от правильного назначения их твердости после термообработки. Твердость у пуансона и матрицы должна быть разной. При вырубке твердость матрицы больше твердости пуансона на 2–4 единицы по Роквеллу (шкала С), а при пробивке твердость пуансона должна быть больше твердости матрицы на 4–6 единиц по Роквеллу (шкала С).

Затупление режущих кромок пуансона и матрицы, помимо заусенцев, вызывает искажение геометрических размеров вырубаемой детали. После выхода из матрицы, деталь распрямляется и ее размеры становятся больше размеров отверстия матрицы (для деталей с габаритными размерами больше 200 мм это увеличение может до-



стигать 0,2–0,25 мм). Устранить описываемый дефект можно своевременной заточкой режущих кромок пуансона и матрицы. При заточке необходимо обращать внимание на состояние рабочих поверхностей. Если на поверхности пуансона или матрицы имеются продольные риски, устанавливать такой инструмент не следует, т. к. рабочие кромки будут быстро выкрашиваться, а штампуемые детали будут иметь рваные края.

Принято считать заточку режущих кромок неудовлетворительной, если при рассмотрении рабочих поверхностей пуансона и матрицы через лупу с 10-кратным увеличением рисок, царапин и неровностей на 1 мм<sup>2</sup> будет больше 20.

Другая причина образования заусенца — наличие обратного конуса на рабочей полости матрицы, то есть конуса со стороны пуансона. По мере удаления от поверхности матрицы, размер отверстия в ней уменьшается. В этом случае при вырубке на отходе будет заусенец. Проталкивание такого отхода через отверстие матрицы затруднено, а тонкостенные матрицы иногда разрываются. Указанный недостаток инструмента можно исправить только расшлифовкой отверстия матрицы (если это допускает зазор между пуансоном и матрицей) или термопосадкой матрицы с последующим шлифованием до требуемых размеров.

Обратный конус наблюдается только у матриц с цилиндрическим пояском. К недостаткам таких матриц следует отнести быстрый износ режущих кромок матрицы, поскольку деталь или отход проталкиваются через нее. Для предотвращения появления заусенцев на штампуемых деталях, режущие кромки таких матриц следует часто затачивать, удаляя при каждой заточке значительный слой металла с поверхности матрицы. Однако применение матриц с цилиндрическим пояском неизбежно, когда отштампованные детали или отходы выталкиваются на поверхность матрицы. Это делается в случае, когда толщина штампуемой детали больше 2 мм или, независимо от толщины, деталь имеет сложную конфигурацию.

Во всех остальных случаях лучше выполнять рабочую полость матрицы с конусом от ее зеркала. Необходимо отметить, что при малых или больших углах конуса наблюдается интенсивный износ режущих кромок матрицы, что снижает ее стойкость. С точки зрения большей стойкости наиболее приемлемым углом конуса является угол в пределах 30–40 мин. При таких углах режущая кромка матрицы облада-



ет достаточной прочностью и может выдержать достаточно большую ударную нагрузку. При этом, чем толще штампуемый материал, больше угол.

Неправильный выбор зазора между пуансоном и матрицей ведет к появлению равномерно распределенных по поверхности среза заусенцев. При большом зазоре деталь на поверхности, обращенной в сторону матрицы, получает значительный изгиб, а по кромкам поверхности, обращенной к пуансону, появляется рваный и протянутый заусенец. При недостаточном зазоре поверхность среза на детали вместо одной блестящей полосы имеет две: одну сверху, а другую снизу со значительными наплывами. По кромке поверхности, обращенной к пуансону, появляется рваный заусенец с небольшим уширением кверху. Недостаточный зазор — одна из причин снижения стойкости штампа до заточки. В силу недостаточной величины зазора, между пуансоном и матрицей часто происходит разрушение (разрыв) матрицы при работе на прессе.

Заусенцы могут быть распределены по поверхности среза неравномерно (односторонние заусенцы). Причиной брака является неправильное распределение зазора между пуансоном и матрицей. Это происходит в случаях смещения пуансона по отношению к режущим кромкам матрицы в процессе работы, непараллельности поверхности стола пресса или подштамповой плиты нижней поверхности ползуна пресса, а также в случае, когда матрица не параллельна верхней части штампа; хвостовик штампа, а если его нет, то верхняя часть штампа закреплены неправильно, т. е. центр давления штампа и ось ползуна пресса не совпадают.

Смещение пуансона по отношению к режущим кромкам матрицы во время работы штампа происходит в следующих случаях:

- при затуплении одной из режущих кромок матрицы раньше других; у затупившегося края возникают повышенные боковые усилия;
- «пружинении» и изгибе пуансонов мелких размеров, что может происходить при неоднородной заточке режущих кромок;
- неравномерном распределении усилия по периметру среза;
- неравномерном износе направляющих колонок штампа;
- упругой деформации станины пресса в процессе вырубки или пробивки, что вызывает перекося осей пуансона и матрицы, особенно в случае штамповки заготовок значительной толщины;
- неправильном изготовлении деталей штампов.

Неправильная форма вырубленной детали может возникнуть в силу следующих причин:

- заправки полосы в многоразовый штамп без использования предварительного упора;
- косообрезанных концов полосы, поступающей на вырубку;
- износа направляющих линеек в штампе;
- использования слишком узкой или слишком широкой полосы;
- изгиба полосы в процессе вырубки или пробивки;
- независимой установки штампа относительно механизма подачи;
- наличия выпуклого торца на пуансоне после заточки;
- недоведения полосы до упора при ручной подаче.

### 5.3.8. Чистовая вырубка и пробивка

В приборостроении, точном машиностроении предъявляются повышенные технические требования к качеству боковой поверхности и точности размеров плоских деталей. Высота блестящего пояска, который образуется при нормальных процессах вырубки и пробивки, а также шероховатость поверхности среза в ряде случаев не удовлетворяют требованиям, которые предъявляются к штампуемым деталям. Требуется, чтобы точность размеров соответствовала 8–11 качеству, а шероховатость боковой поверхности (по всей толщине) соответствовала параметру  $R_a = 1,25 \dots 0,63$  мкм для цветных металлов и  $R_a = 2,5 \dots 1,25$  мкм для стальных изделий.

В массовом и крупносерийном производстве наиболее эффективными способами получения плоских деталей, которые удовлетворяют этим требованиям, является чистовая вырубка и пробивка и зачистка. Применение этих операций в ряде случаев заменяет механическую обработку, что существенно повышает производительность труда и снижает удельный расход металла. Чистовую вырубку и пробивку применяют для получения деталей из конструкционных и низколегированных сталей, латуни, меди, алюминия и алюминиевых сплавов [5, 9].

Увеличение высоты блестящего пояска и гладкости поверхности среза может быть достигнуто в основном двумя путями: повышением пластичности материала за счет увеличения действия всестороннего сжатия или изменением геометрии рабочих частей штампа.

Наиболее широко применяется чистовая вырубка и пробивка с предварительным сжатием заготовки при весьма малом зазоре между режущими кромками пуансона и матрицы (рис. 5.20). Вырубка со сжатием выполняется в условиях, когда свободные поверхности в очаге деформации отсутствуют и заготовка зажата между торцами пуансона и выталкивателя, а также между торцами матрицы и прижима. Обычно такая операция производится на специализированных прессах или штампах.

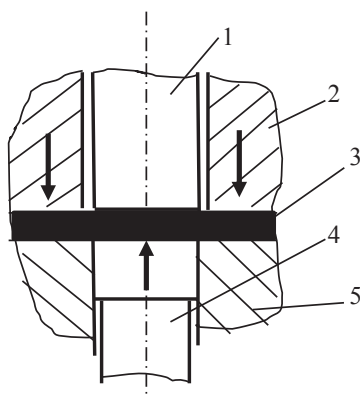


Рис. 5.20. Схема чистовой вырубки (пробивки) с предварительным сжатием заготовки:

1 — пуансон; 2 — прижим; 3 — заготовка; 4 — выталкиватель; 5 — матрица

Всестороннее сжатие заготовки в зоне очага деформации повышает пластичность металла. Вследствие этого возникновение трещин у режущих кромок может отсутствовать. Условия деформирования близки к чистому сдвигу, ширина очага деформации уменьшена по сравнению с обычной вырубкой (пробивкой). Деформации по толщине заготовки распределены более равномерно. Разрушение материала происходит почти одновременно по всей толщине без образования трещин, идущих от режущих комок.

Всестороннее сжатие может приводить к тому, что утяжины вблизи поверхности среза меньше, чем при обычной вырубке (пробивке). Это связано с уменьшением действия изгибающих моментов на процесс деформирования в начальной стадии.

При вырубке со сжатием зазор между пуансоном и матрицей берется равным 0,005–0,01 мм, существенно меньшим, чем при обычной вырубке.

Для большей локализации очага деформации, при вырубке со сжатием на прижиме, а иногда (при  $s > 5$  мм) и на матрице применяют клиновые ребра, которые врезаются в материал до начала сдвига. При этом материал заготовки сжимается вблизи очага деформации кольцевым клиновидным ребром, выполненным за одно целое с прижимным кольцом штампа. При штамповке толстолистого металла ( $s > 4$  мм), клиновидное ребро делают на матрице. Отделение одной части заготовки происходит в результате сдвига под действием касательных напряжений. Оптимальные размеры клиновых ребер устанавливаются экспериментально и приводятся в справочниках. При геометрически простой форме контура штампуемой детали, клиновидное ребро располагается повторяя форму контура, при сложной форме — ребро должно плавно огибать угловые участки.

Соппротивление сдвигу при вырубке со сжатием больше, чем при обычной вырубке и может превышать временное сопротивление  $\sigma_v$ . Величина удельного давления наружного прижима на заготовку и внутреннего прижима снизу на пуансон должна примерно быть равна временному сопротивлению материала  $\sigma_v$ .

Полное (суммарное) усилие прессы  $P$ , необходимое для чистовой вырубки (пробивки) со сжатием заготовки, в 1,65–2,25 раза больше, чем при обычной вырубке.

Обычно чистовую вырубку и пробивку выполняют на пресс-автоматах с механическим приводом при номинальном усилии до 6,3 МН для штамповки деталей толщиной до 16 мм на пресс-автоматах с гидравлическим приводом, с номинальным усилием до 25 МН для штамповки деталей толщиной до 40 мм. Пресс-автоматы последовательно развивают: усилие, необходимое для прижима заготовки к матрице до начала вырубки (пробивки) и внедрения клиновидного ребра; затем усилие вырубки (пробивки) и усилие, необходимое для противодействия и выталкивания из матрицы готовых деталей. При отсутствии пресс-автоматов, для чистовой вырубки (пробивки) можно использовать универсальные механические прессы, оснащенные гидравлическими устройствами для прижима заготовки и создания противодействия в процессе штамповки деталей.

Качественную поверхность разделения можно получить за счет изменения рабочих частей штампа: притупления режущей кромки матрицы (вырубка с обжимкой) или пуансона; вырубки пуансоном с разме-

рами большими (полнее) размеров матрицы и пробивки пуансонами, имеющими специальную форму рабочей части.

При вырубке (пробивке) с притуплением режущих кромок притупляют одну из сопряженных режущих кромок (матрицы или пуансона). Другая режущая кромка должна оставаться острой во избежание появления торцовых заусенцев. Обычно при вырубке притупляют режущую кромку матрицы, а при пробивке — пуансона.

В случае притупления режущих кромок уменьшается концентрация напряжений у притупленной кромки, а трещина зарождается у острой режущей кромки и, развиваясь, переходит на скругленную кромку сопряженного инструмента. Некоторый избыток металла при дальнейшем движении рабочего инструмента сдвигается на боковые поверхности среза. Все это способствует увеличению блестящего пояска.

Вырубка пуансоном, размеры которого превышают размеры матрицы (рис. 5.21), используется для изменения схемы напряженного состояния при вырубке для увеличения высоты блестящего пояска и улучшения гладкости поверхности среза. Между торцами пуансона и матрицы в этом случае образуется участок, который находится в условиях всестороннего сжатия, что повышает пластичность металла. Вследствие этого трещины на поверхности среза не образуются.

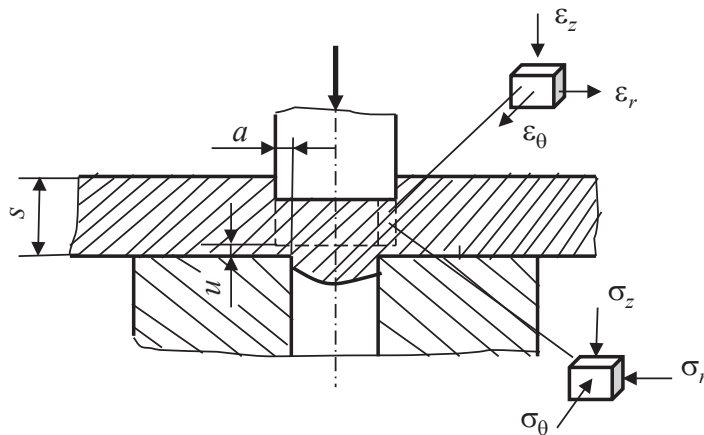


Рис. 5.21. Схема чистой вырубки пуансоном больше окна матрицы

Чем больше размер  $a$ , тем больше всестороннее сжатие в очаге деформации, тем больше контактные напряжения и усилие деформирования. Обычно рекомендуются значения  $a = (0,1 \dots 0,15)s$ . Более под-

робные рекомендации о выборе рабочих размеров инструмента даны в справочниках.

При вырубке пуансоном, размеры которого больше размеров матрицы, пуансон не может пройти в отверстие матрицы (рис. 5.21). В связи с этим пуансон не должен доходить до зеркала матрицы на величину  $u \approx 0,1s$ , тогда окончательное разделение частей заготовки происходит при обратном ходе пуансона, когда силы трения на боковых поверхностях пуансона и матрицы действуют в противоположных направлениях, отрывая одну часть заготовки от другой и разрушая перемычку между ними. Недостатком указанного способа вырубки является образование шероховатого пояска отрыва.

Для улучшения качества поверхности среза и гарантированного разделения частей заготовки рекомендуется применение ступенчатых пуансонов, у которых размер нижней ступени (меньших поперечных размеров) равен размеру отверстий матрицы, уменьшенных на величину нормального зазора при вырубке (пробивке). В этом случае на заключительной стадии деформирования отделенная часть заготовки полностью проталкивается в отверстие матрицы, и рваной поверхности среза не возникает.

Для пробивки чистовых отверстий применяют три типа пуансонов (рис. 5.22). Первый тип — ступенчатый — применяют для пробивки отверстий в деталях из медных сплавов и дюралюминия. Процесс пробивки протекает в два этапа. Вначале частью пуансона меньшего диаметра  $d$  осуществляется обычная пробивка, а затем участком с большим диаметром  $D$  срезается припуск, таким образом получается отверстие заданного диаметра и требуемой шероховатости. Недостаток такого способа чистовой пробивки — невозможность заточки пуансона.

Второй тип — пуансон с остроконечным торцом — используется для пробивки в деталях отверстий, диаметр которых близок к толщине материала. При пробивке пуансон углубляется в материал на 75–90 % его толщины, отрывает образовавшийся отход и заглаживает стенки отверстия.

Третий тип — пуансон с торцом, имеющим форму усеченного конуса, — используется для пробивки отверстий в малоуглеродистой стали. Пуансон заходит в материал примерно на 60–70 % его толщины, вытесняя материал отверстия вниз и в стороны. Образуются трещины скалывания, отход выталкивается, а стенки отверстия в результате этого заглаживаются.

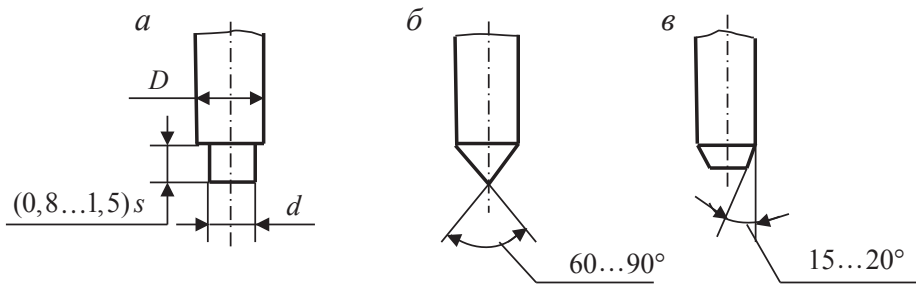


Рис. 5.22. Типы (а–в — первый — третий) пуансонов для чистой пробивки

### 5.3.9. Зачистка в штампах

Вырубка со сжатием, требующая специализированного оборудования и высокоточных дорогих штампов, не всегда оказывается экономически целесообразной для получения деталей с точными размерами и боковой поверхностью, перпендикулярной плоскости заготовки и обладающей низкой шероховатостью. Достаточно хорошее качество вырубаемых деталей можно получить путем применения операций зачистки и калибровки.

Назначение операции зачистки — повышение точности размеров обрабатываемой детали и получение повышенного качества боковой поверхности детали по сравнению с обычной вырубкой и пробивкой. Зачисткой обрабатывают заготовки из цветных металлов и сплавов (медь и медные сплавы, алюминий и алюминиевые сплавы и др.), низкоуглеродистой и коррозионно-стойкой стали и титановых сплавов. Зачистку применяют в основном в приборостроении вместо механической обработки, что существенно снижает трудоемкость изготовления детали.

Размеры деталей, подвергающихся зачистке, не превышают 150–2100 мм при толщине материала 3–4 мм. Зачистка более крупных деталей связана с трудностями при изготовлении штампов. Зачистку деталей толщиной более 3–4 мм (до 8–10 мм) выполняют за несколько операций.

Шероховатость поверхности после зачистки  $R_a = 1,25 \dots 0,32$  мкм при толщине до 3 мм и  $R_a = 2,5 \dots 1,25$  мкм при толщине более 3 мм. При этом достигается точность размеров, соответствующая 8–11-му качеству.



Ширина отделяемого зачисткой слоя материала всегда меньше толщины заготовки. Процесс его отделения принципиально иной по сравнению с таковым при вырубке и пробивке. Повышение качества поверхности среза при зачистке достигается срезанием припуска на боковых поверхностях детали с переводом части материала в стружку. Отделение припуска в виде стружки происходит постепенно, по мере опускания пуансона вплоть до опорной поверхности заготовки, а не путем скалывания, как при обычной вырубке и пробивке.

В зависимости от того, какой контур обрабатывают (внешний или внутренний), работает только одна режущая кромка инструмента. Отделение стружки осуществляется в основном режущей кромкой матрицы при зачистке наружного контура и режущей кромкой пуансона при зачистке внутреннего контура. Образование гладкой поверхности при срезании стружки зависит от остроты режущих кромок, толщины срезаемого припуска, механических свойств материала заготовки и ряда других факторов. При зачистке по наружному контуру, необходимо укладывать заготовку в штампе так, чтобы блестящий пояс был обращен к матрице, а при зачистке внутреннего контура — к пуансону. Это позволяет на заключительной операции зачистки срезать минимальный припуск, что позволяет избежать отрыва припуска с образованием шероховатой поверхности на заключительной стадии срезания стружки.

Схема деформирования при срезании припуска по наружному и внутреннему контурам детали показана на рис. 5.23.

Зачистка может осуществляться как пуансоном, размеры которого меньше размеров матрицы, так и пуансоном, большим матрицы. Зазор  $z$  при этом составляет 0,01–0,02 мм на сторону. В последнем случае зазор  $z$  отрицательный. Пуансон при этом не доходит до режущей кромки матрицы на 0,2–0,3 мкм. Стружка упирается в торец пуансона и отделяется при проталкивании следующей детали. Ввиду малых зазоров при зачистке пуансоном с размерами меньшими размеров матрицы необходимо тщательно изготавливать инструмент. При зачистке пуансоном больше матрицы требуется применение прессов высокой точности и тщательная установка штампов.

Зачистке могут быть подвергнуты как отдельно взятые отверстия, так и группы отверстий одновременно. Образование стружки при зачистке отверстий происходит так же, как и при зачистке наружного контура, но при зачистке отверстий последовательное образование



кольцевых элементов стружки протекает внутри отверстия, поэтому стружка не разрывается, а сохраняется целой, в виде трубочки с блестящей внутренней и шероховатой наружной поверхностью (рис. 5.23, б).

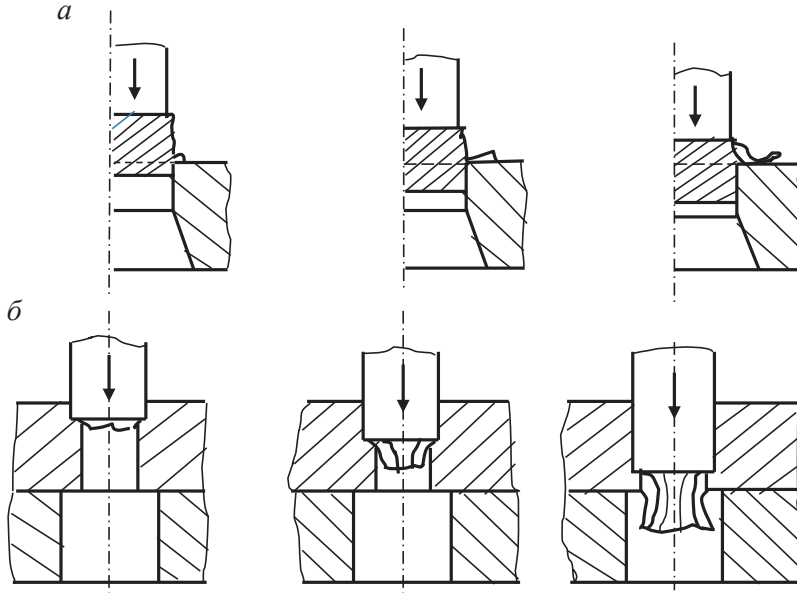


Рис. 5.23. Схема зачистки (а) по наружному и (б) внутреннему контуру

Зачистку отверстий малого диаметра в штампах производят после сверления или пробивки. Если диаметры отверстий в изготавливаемой детали больше толщины детали, то отверстия пробивают, а если меньше — их следует сверлить по кондуктору или кернам, то есть по разметке. Разметку осуществляют в керновочных штампах.

Применение операции кернения под сверление ограничивается толщиной обрабатываемых деталей: для деталей из стали 3 мм, из латуни и алюминия 3–5 мм. При сверлении по кернам деталей большей толщины наблюдается уход сверла более чем на 0,05 мм, что при точном сверлении недопустимо.

При выборе диаметра зачистных пуансонов необходимо учитывать изменение отверстия после зачистки вследствие упругой деформации зачищаемой детали.

Диаметр зачистного пуансона  $D$ , мм, определяется по выражению

$$D = \left( D_0 + \frac{2}{3} \delta \right) + i - \delta_{\text{п}},$$

где  $D_0$  — номинальный диаметр зачищаемого отверстия;  $\delta$  — допуск на отверстие;  $i$  — величина усадки отверстия;  $\delta_n$  — допуск на изготовление пуансона.

Величина  $i$  для мягкой стали составляет 0,008–0,015 мм, для алюминия — 0,005–0,01 мм и для латуни — 0,007–0,012 мм.

Усилие  $P$ , кг, для зачистки отверстий малого диаметра рассчитывается по формуле

$$P = \pi d y q n,$$

где  $d$  — диаметр зачищаемого отверстия, мм;  $y$  — припуск на зачистку отверстия, мм;  $q$  — удельное давление зачистки, кг/мм<sup>2</sup>, значение которого приводится в табл. 5.5;  $n$  — число одновременно работающих зачистных пуансонов.

Таблица 5.5

**Значения удельных давлений  $q$ , кг/мм<sup>2</sup>, в зависимости от сечения стружки\*, снимаемой при зачистке, и толщины зачищаемой детали**

Толщина, зачищаемой детали, мм	Сечение стружки, мм <sup>2</sup>						
	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,27	0,3
0,4–0,5	200	180	160	140	120	110	100
0,6–2,0	215	195	170	150	125	115	105
2,1–3,0	230	205	180	155	130	120	110

\* Сечение стружки определяется по формуле  $f = \pi d y$ , мм<sup>2</sup>.

Необходимыми условиями качественной зачистки по наружному контуру, помимо зачистных операций, являются обязательная правка заготовок и правильный выбор припуска  $\Delta$  под зачистку. Припуском под зачистку называется разность между наименьшим размером заготовки, поступающей на зачистку, и наибольшим размером детали, получаемой после зачистки. Величина припуска под зачистку и ее распределение по контуру зачищаемой детали оказывают существенное влияние на чистоту поверхности среза и точность размеров.

Детали и заготовки, полученные вырубкой и пробивкой, имеют слегка конусную боковую поверхность (см. рис. 5.19), поэтому соответствующие друг другу поперечные размеры внешнего контура заготовки (или поперечные размеры отверстия в заготовке) неодинаковы (рис. 5.24).

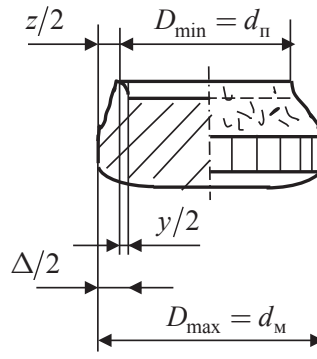


Рис. 5.24. Схема расположения припуска на зачистку

Наибольший поперечный размер заготовки (отверстия) равен размеру рабочего отверстия матрицы ( $D_{\max} = d_{\text{м}}$ ), наименьший — размеру пуансона ( $D_{\min} = d_{\text{п}}$ ), а их разность равна значению двустороннего оптимального зазора  $z_{\text{опт}}$  между матрицей и пуансоном

$$D_{\max} - D_{\min} = z_{\text{опт}}.$$

Таким образом, чтобы соответствующие друг другу размеры внешнего контура заготовки (или отверстия в ней) были одинаковы во всех сечениях параллельных плоскости листа, необходимо удалить припуск шириной  $z/2$ , но при таком припуске нельзя гарантировать получение чистой блестящей поверхности среза по всей толщине, особенно у ее кромки. Поэтому односторонний припуск на зачистку  $\Delta/2$  должен быть больше, чем  $z/2$ , на некоторый размер  $y/2$ . Следовательно,

$$\Delta = z + y,$$

где  $\Delta$  — полный двусторонний припуск на зачистку;  $y$  — дополнительный двусторонний припуск.

Если контур детали плавный с радиусами закругления более  $5s$ , где  $s$  — толщина детали, распределение припуска равномерное. Если заготовка получена безотходной вырубкой или отрезкой, зачистка осуществляется в две операции, припуск распределяется в зависимости от контура зачищаемой детали, и, если контур зачищаемой детали сложной формы или имеет острые или тупые углы, зачистка осуществляется в две операции.

Пуансоны и матрицы зачистных штампов изготавливают из стали X12M. Твердость после термообработки HRC 60–62. Режущие кром-

ки матрицы скошены в сторону от рабочего контура под углом 10–15° к горизонтали. Угол скоса матрицы зависит от материала заготовки и припуска.

Припуск  $u$  зависит от рода зачищаемого металла, его толщины и формы контура детали. Припуски на зачистку устанавливают по табл. 5.6, для гетинакса и текстолита 0,2–0,5 толщины листа.

Таблица 5.6

Двусторонние припуски  $\Delta$  в обычных матрицах под зачистку, мм

Толщина материала, мм	Латунь, алюминий, мягкая сталь	Сталь средней твердости	Твердая углеродистая и высоколегированные стали
1–1,5	0,1–0,15	0,15–0,20	0,15–0,25
1,5–2,5	0,15–0,20	0,20–0,25	0,20–0,30
2,5–4,0	0,20–0,25	0,25–0,30	0,25–0,35
4–5	0,25–0,30	0,30–0,35	0,30–0,40
5–7	0,3–0,35	0,4–0,45	0,45–0,5
7–10	0,35–0,40	0,45–0,50	0,55–0,6

Детали толщиной 3–6 мм при простом контуре могут быть зачищены за одну операцию, при сложном контуре — за две или три операции. Припуск на первую операцию выбирается по табл. 5.6, а на последующие — на 40 % меньше.

Зачистке плохо поддаются стали, легированные молибденом, ванадием и никелем.

Усилие зачистки обычно составляет примерно 25 % усилия вырубки-пробивки.

Размеры матрицы и пуансона для зачистки наружного контура определяют по формулам

$$D_m = D + z + y; D_n = D + y,$$

где  $D$  — диаметр детали после зачистки;  $z$  — диаметральный зазор между матрицей и пуансоном;  $y$  — припуск на зачистку.

Припуск на диаметр отверстий принимается после сверления 0,1–0,15 мм, после пробивки 0,15–0,20 мм.

При многократной зачистке полный двусторонний припуск на зачистку

$$\Delta = y(0,7N + 0,3) + z,$$

где  $N$  — число операций зачистки.

Величину припуска при зачистке отверстия малого диаметра для отверстий длиной до 3,5 мм при расстоянии между ними не более 40 мм принимают после сверления 0,1–0,15 мм на диаметр, а после пробивки — 0,15–0,2 мм.

Применяют комбинированный способ, совмещающий пробивку и зачистку. Такой способ осуществляется ступенчатым пуансоном. Конструкция матрицы та же, что и при пробивке, у одной части пуансона зазор с матрицей  $z_1$ , у другой —  $z_2$ . В начале рабочего хода осуществляется пробивка отверстия, при дальнейшем движении пуансона срезается припуск.

Пробивка ступенчатым пуансоном листового материала обеспечивает высоту неровностей 1,6–10 мкм, но высокой точности достичь невозможно. Отверстие получается коническим.

Необходимо отметить, что зачистка позволяет удалить механическим путем упрочненный слой, расположенный по контуру детали и отверстия, которые получены обычной вырубкой и пробивкой. При выполнении формоизменяющих операций (например, отбортовки отверстия) отсутствие упрочненного слоя по контуру позволяет повысить предельную степень деформации.

Применение чистовой вырубки и пробивки из-за высоких контактных напряжений на рабочем инструменте требует использования специальных технологических смазочных материалов: ХС-147; ХС-163, ХС-164, Укринол 5/5 и др. Эти материалы обладают высокой адгезией и теплопроводностью. Применение данных материалов уменьшает контактное трение, предохраняет инструмент от налипания, исключает задиры, вырывы и т. п.

---

## 6. Формообразующие операции листовой штамповки

### 6.1. Классификация формоизменяющих операций

**Л**истовой штамповкой путем изменения формы листовой заготовки изготавливают самые разнообразные необходимые в технике и быту детали: металлическую посуду, детали автомобилей, тракторов, самолетов, вагонов, ракет, консервные банки и детали различных резервуаров и котлов, детали морских судов, части велосипедов и мотоциклов и др. Трудно перечислить даже основные детали, получаемые листовой штамповкой, настолько их сортамент многообразен. Это предопределяет и многообразие видов формоизменяющих операций листовой штамповки. Выделим только их основные виды.

В листовой штамповке применяют следующие основные виды формоизменения заготовки: гибку, вытяжку, ротационную вытяжку, обтяжку, местную формовку, отбортовку, обжим, раздачу [7].

Гибка — формоизменение, основное назначение которого состоит в изменении кривизны всей или части заготовки в плоскости гибки.

Вытяжка — формоизменение листовой заготовки в чаше- или коробкообразную оболочку или заготовки в виде такой оболочки в более глубокую оболочку.

Ротационная вытяжка — формоизменение вращающейся круглой листовой заготовки в осесимметричную оболочку или заготовки в виде такой оболочки в оболочку другой формы и толщины.

Обтяжка — формоизменение листовой заготовки в оболочку, состоящее в ее растяжении и одновременном обтягивании по пуансону.

Местная формовка — формоизменение относительно небольшого участка листовой заготовки.

Отбортовка — формоизменение, при котором часть листовой заготовки, расположенная вдоль ее замкнутого или незамкнутого конту-

ра, под действием пуансона смещается в матрицу, одновременно растягивается, поворачивается и превращается в борт.

Раздача — формоизменение трубы, в результате которого удлиняется и расширяется контур поперечного сечения на отдельном кольцевом участке или по всей ее длине.

Обжим — формоизменение полой цилиндрической заготовки в целях уменьшения поперечных размеров краевой ее части.

## 6.2. Штампуемость

Изготовление деталей из листовых материалов методами обработки металлов давлением связано с допустимым формоизменением материала. Допустимое формоизменение является функцией многих переменных, в числе которых одной из существенных является штампуемость — способность металла деформироваться при формоизменяющих операциях листовой штамповки без разрушения. В таком определении штампуемости есть некоторая неопределенность, связанная с тем, что схемы напряженного и деформированного состояний при различных формоизменяющих операциях листовой штамповки различны, отсюда и различны условия возникновения разрушений металла. Один и тот же материал может хорошо штамповаться (допускать значительное формоизменение) при одной операции, а при другой может показать худшую штампуемость.

Результаты многочисленных исследований и производственного опыта показывают, что штампуемость существенно зависит от химического состава материала; его строения, которое для металлов определяется: типом кристаллической решетки; размером зерна, однородностью размеров зерен и их формой; строением зерен; текстурой, создаваемой преимущественной ориентировкой кристаллографических осей в зернах поликристаллического материала; полосчатостью макроструктуры [5].

Характер и степень влияния этих факторов весьма сложны. Кроме того, состояние металла может меняться. Так, в условиях двухосного растяжения, при малых деформациях, на поверхности деталей появляются полосы, следы местного утонения, расположенные хаотически. Такие линии называются линиями течения, в отличие от линий скольжения.

Линии скольжения имеют определенную конфигурацию, которая соответствует данному полю напряжений. У листового металла они проявляются при разноименных схемах напряженного состояния, при которых максимальное касательное напряжение расположено в площадках, перпендикулярных или наклоненных к поверхности листовой заготовки.

Линии течения проявляются при двухосном одноименном напряженном состоянии, когда в плоскости заготовки все направления являются главными, а площадки с максимальным касательным напряжением расположены под углом  $45^\circ$  к поверхности заготовки. Именно поэтому линии течения имеют хаотический вид, отражая неоднородность свойств металла, а не поля напряжений.

Линии течения портят поверхность детали, например при штамповке облицовочных деталей автомобиля, которые должны быть гладкими, и вынуждают перед окраской проводить дополнительные грунтовочные работы с тем, чтобы скрыть следы местного утонения в линиях течения, сделать их невидимыми в готовой детали.

Линии течения появляются при штамповке деталей из металлов, которые имеют площадку текучести на диаграмме деформирования при испытании на растяжение (низкоуглеродистые стали, молибден и его сплавы, латуни, нейзильбер и др.). Площадка текучести соответствует нарастанию пластической деформации при постоянном деформирующем усилии. Чем больше площадка текучести, тем в большей степени могут проявляться линии течения. Величина площадки текучести, а следовательно, и линий течения при прочих равных условиях увеличивается с уменьшением размеров зерен и скорости деформирования. Для устранения линий течения наиболее рационально предварительно (до штамповки) деформировать листовой металл на величину деформации несколько большую, чем деформация в пределах площадки текучести. Эта деформация обеспечивается либо холодной прокаткой листа с малыми обжатиями (дрессировка), либо гибкой листа в специальных вальцах типа правильных, но с регулируемым изгибом.

Сезонное растрескивание — самопроизвольное образование в металле трещин без воздействия внешних сил. Это явление чаще наблюдалось весной и осенью, отсюда и название. Сезонное растрескивание наблюдается не только в латунях, где оно впервые было обнаружено, но и во многих других металлах и сплавах. Например, такое растрескивание может иметь место в аустенитной, коррозион-



но-стойкой стали, особенно при повышении температуры до 400° С. Сезонное растрескивание происходит в результате межкристаллитной коррозии.

Воздействовать на интенсивность межкристаллитной коррозии можно как путем изменения химического состава сплава, так и снятия остаточного напряжения, которое не только создает разрушающие (растягивающие) силы, но и существенно ускоряет протекание межкристаллитной коррозии. Еще одним способом борьбы с сезонным растрескиванием является нанесение на поверхность изделия защитных пленок, уменьшающих контакт поверхностей деталей с атмосферой.

С течением времени прочностные свойства металла увеличиваются, а характеристики пластичности уменьшаются. С этим связано явление старения. Старение возникает из-за диффузионных процессов в металле, в результате которых происходит накопление препятствий движению дислокаций. Старение может быть естественным, протекающим при комнатной температуре, и искусственным (термическим), протекающим при нагреве. При листовой штамповке естественное старение может сказаться на допустимой деформации и привести к увеличению брака по разрывам.

При проектировании процессов листовой штамповки, одним из важнейших является параметр, связанный с определением допустимой (предельной) степени деформирования в той или иной операции. От ее правильного выбора зависит как качество изделия (эксплуатационная надежность, внешний вид и т. п.), так и возможность наиболее полного использования способностей материала к деформированию. Это окажет влияние на число переходов при штамповке, стоимость оснастки и т. п.

Предельное формоизменение в операциях листовой штамповки обычно кроме разрушения металла ограничивается потерей устойчивости, что ведет к образованию складок, гофр, короблению и других дефектов (первый вид потери устойчивости), а также к образованию «шейки» или чрезмерному утонению (второй вид потери устойчивости), возникновению трещин, надрывов, разрушению, комбинируемому действию указанных факторов.

Приближенную оценку штампуемости можно получить на основании результатов испытания металлов как способами, регламентированными ГОСТами, так и дополнительно разработанными.

Согласно Государственным стандартам при испытании на растяжение обычно определяются две основные характеристики: временное сопротивление  $\sigma_{\text{в}}$  и относительное удлинение  $\delta = \Delta l/l_0$ . Для деформированных металлов в ряде ГОСТов (например, ГОСТ 11701–84) даны рекомендации по определению величины равномерного относительного удлинения  $\delta_{\text{р}}$  и истинного предела прочности  $\sigma_{\text{ист}} = P_{\text{max}}/F_{\text{ист}}$ , где  $P_{\text{max}}$  — максимальное усилие в момент образования в испытуемом образце шейки;  $F_{\text{ист}}$  — площадь поперечного сечения образца в момент начала образования шейки.

В этих же ГОСТах регламентируется определение также коэффициента анизотропии  $R_s$ . Коэффициент анизотропии  $R_s = \frac{\ln b_0/b}{\ln s_0/s}$  определяет соотношение между изменением ширины и толщины плоского образца в условиях линейного напряженного состояния. Здесь  $b_0$  и  $b$  — начальная и конечная ширина образца в зоне равномерного удлинения, а  $s_0$  и  $s$  — начальная и конечная толщина образца в той же зоне.

Кроме коэффициента анизотропии  $R_s$ , могут определяться коэффициенты анизотропии свойств в плоскости листа  $R_{\alpha}$ . Для металлов с кубической решеткой целесообразно определение коэффициента анизотропии  $R_{\alpha}$  при испытании на растяжение вдоль направления прокатки и под углом  $45^\circ$  к нему. Коэффициент  $R_{\alpha}$  характеризует возможность появления и высоту фестонов, возникающих при вытяжке осесимметричных деталей.

Кроме отмеченных показателей, целесообразно определение физического предела текучести  $\sigma_{\text{т}}$ , если имеется площадка текучести, и условного предела текучести  $\sigma_{0,2}$ , если площадка отсутствует. Условный предел текучести соответствует возникновению остаточной относительной деформации удлинения, равной 0,2 %.

Считается, что способность к вытяжке тем больше, чем больше отношение  $\sigma_{\text{в}}/\sigma_{\text{т}}$  и чем больше значения  $\delta_{\text{р}}$  и  $R_s$ . Первые два показателя до некоторой степени характеризуют способность к упрочнению, а практика показывает, что более упрочняющиеся материалы допускают большее формоизменение при вытяжке. Показатель  $R_s$  характеризует способность сопротивляться локальному утонению при вытяжке, и с увеличением  $R_s$  утонение уменьшается, а следовательно, опасное сечение способно передавать большее усилие, что приводит к увеличению допустимого формоизменения. Из практики штампов-

ки установлено, что наиболее пригодны для вытяжки металлы, имеющие следующие показатели:

$$\delta_p > 25\%; \sigma_b/\sigma_T = 1,4...1,7 \text{ и } R_s = 1,4...1,8.$$

Приведенные показатели, определяемые при испытаниях на растяжение, позволяют до некоторой степени судить о способности материала к вытяжке, но на практике обнаруживается их недостаточная точность. Это вынуждает изыскивать иные способы испытания металлов. Предложено для оценки штампуемости значительное количество так называемых технологических проб. Некоторые из них регламентированы ГОСТами.

Так, в ГОСТах на листовой металл из технологических проб обычно предусматривается испытание на перегиб и испытание на глубину выдавливания сферической лунки по Эриксену.

При испытании на перегиб определяется число перегибов до разрушения. По своей сути это испытание является испытанием на малоцикловую усталость, и до некоторой степени результаты этого испытания указывают на способность металла противостоять знакопеременному изгибу.

Большое распространение получило испытание на выдавливание лунки по Эриксену. При этом испытании круглая или квадратная заготовка, вырезанная из испытуемого материала, зажимается между матрицей и вкладышем прижимного кольца так, что течение металла между ними исключается. Выдавливание лунки осуществляется пуансоном, имеющим сферический рабочий торец. Процесс выдавливания продолжается до появления трещины в выдавливаемом металле, наблюдаемой с помощью зеркала, установленного на корпусе прибора. Показателем штампуемости при испытании по Эриксону является глубина лунки до появления трещины. Это достаточно простое испытание весьма приближенно оценивает штампуемость металла, в частности способность к вытяжке. Это объясняется в первую очередь тем, что формовка лунки по Эриксену происходит по схеме напряженного состояния, близкого к двухосному растяжению, отличной от схемы напряженного состояния во фланце при вытяжке. Кроме того, на глубину лунки, кроме свойств металла, оказывает влияние относительная толщина заготовки и условия трения. С увеличением толщины заготовки, глубина лунки до разрушения увеличивается, вследствие чего в ГОСТах указываются допустимые значения глубины лунки для дан-

ного металла в зависимости от толщины. Влияние сил трения можно исключить, заменив действие металлического пуансона давлением жидкости.

Испытание на гидростатическое выпучивание или выдавливание по Эриксену может дать полезную информацию о возможном поведении металла при глубокой вытяжке сферических или пространственных деталей, при штамповке которых разрушение может происходить на участках, деформирующихся по схеме двухосного растяжения.

В целях получения более достоверных данных о способности металла к вытяжке было разработано несколько других вариантов технологических проб, в которых испытуемая заготовка подвергается вытяжке без утонения стенки цилиндрического колпачка. Первоначально методика этого испытания была разработана Г. Свифтом (Англия) и получила развитие в трудах советских ученых Л. А. Шофмана, А. В. Алтыкиса и др. При испытании круглая заготовка цилиндрическим пуансоном протягивается через кольцевую матрицу. Показателем способности к вытяжке является предельный коэффициент вытяжки, определяемый как отношение диаметра заготовки к диаметру вытягиваемого стакана, при котором разрушение заготовки не происходит.

Имеется ряд вариантов совершенствования методики испытаний. Например, по методу Энгельгардта вытяжка цилиндрического стакана из круглой заготовки осуществляется с записью диаграммы изменения усилия по пути пуансона. После достижения максимального усилия вытяжки  $P_{\max}$  резко увеличивается усилие прижима до значений, при которых деформирование фланца прекращается. Продолжающееся перемещение пуансона относительно матрицы приводит к увеличению усилия деформирования до значения  $P_{\text{отр}}$ , при котором происходит отрыв дна вытягиваемого стакана. Отношение  $\frac{P_{\max}}{P_{\text{отр}}}$  харак-

теризует способность металла к вытяжке.

Были предложены и другие технологические пробы. Поиск новых методов испытаний на штампуемость в целях получения более достоверных сведений об этой способности металлов и сплавов продолжается.

### 6.3. Гибка

Гибка — процесс штамповки, при котором изменяется кривизна срединной поверхности заготовки в плоскости изгиба, в результате чего получается деталь пространственной формы. Гибка является одной из наиболее распространенных формоизменяющих операций холодной штамповки, которая широко используется для получения разнообразных деталей из листового материала, профильного проката, труб и проволоки. Гибка может производиться одновременно и с другими операциями — отрезкой, вырубкой, пробивкой.

Удельный вес гибочных работ непрерывно увеличивается за счет новых принципов конструирования и технологии изготовления машин и приборов. В зависимости от размеров и формы детали, профиля исходной заготовки и характера производства, гибка осуществляется [5, 6]:

- методом свободной гибки в универсальных штампах на специальных гибочных прессах;
- методом гибки в инструментальных штампах на кривошипных, эксцентриковых, фрикционных и гидравлических прессах;
- гибкой-прокаткой на валковых копировально-гибочных станках;
- гибкой-прокаткой на роликовых станках;
- гибкой с растяжением на специальных обтяжных и профилегибочных станках;
- гибкой на универсально-гибочных автоматах.

По способу приложения внешних нагрузок, процессы гибки подразделяются следующим образом:

- гибка моментом;
- изгиб поперечной силой;
- гибка с приложением торцевого усилия (растяжения или сжатия);
- гибка с радиальным сжатием;
- гибка с аксиальным сжатием (растяжением).

#### 6.3.1. Сущность процессов гибки.

##### Напряженно-деформированное состояние при гибке

Свободной гибкой (гибкой моментом) обычно получают изделия с помощью универсальных штампов на листогибочных прессах. Принципиальная схема процесса гибки заготовок в универсальных штам-

пах заключается в пластическом изгибе заготовки путем соответствующего перемещения пуансона (рис. 6.1).

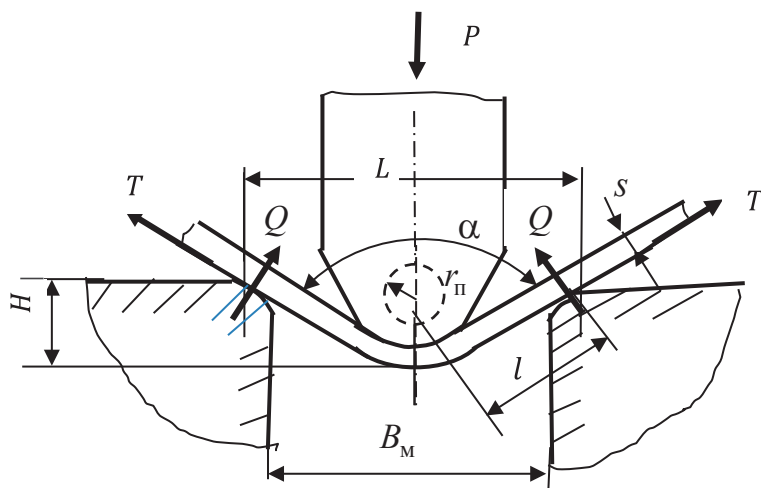


Рис. 6.1. Схема свободной гибки

При свободной гибке, под воздействием одного только изгибающего момента, продольные и поперечные силы отсутствуют. При этом осуществляется схема так называемого чистого изгиба. Заготовка контактирует с инструментом только в двух или трех точках. Пуансон и матрица не препятствует заготовке принять форму изгиба, соответствующую силовой схеме нагружения. Требуемый угол изгиба  $\alpha$  обеспечивается путем регулировки величины хода пуансона. На одном комплекте инструмента можно получить детали с различным углом изгиба  $\alpha$  за счет большего или меньшего перемещения пуансона в ручье матрицы.

Кривизна срединной поверхности заготовки на участке изгиба постоянна в любой момент деформирования; плоскости, перпендикулярные срединной поверхности заготовки, остаются плоскими в процессе изгиба. Экспериментальные данные (рис. 6.2), полученные при чистом изгибе полосы симметричной относительно плоскости внешних сил, показывают, что деформация происходит вблизи углов гибки — очагов деформации, а после деформации:

- линии 1—3 и 2—4 остались прямыми, но наклонились друг к другу и образуют некоторый угол;
- отрезок 1—2 укоротился, а отрезок 3—4 удлинился;

- ширина балки в сжатой зоне увеличилась, а в растянутой уменьшилась;
- профиль сечения изменился.

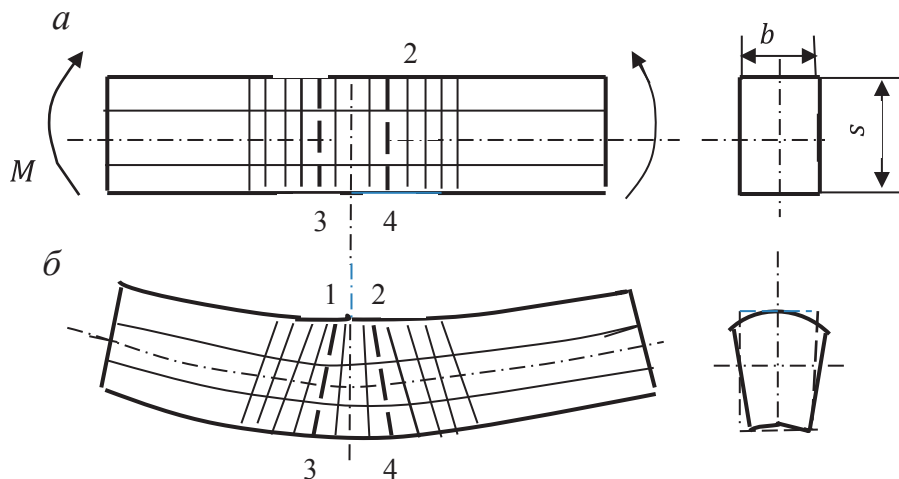


Рис. 6.2. Изгибаемый брус до деформации (а) и после деформации (б)

Экспериментальные данные позволяют сделать следующие выводы о характере деформаций полосы при чистом изгибе: поперечные сечения полосы остались плоскими, лишь повернулись одно относительно другого на угол. Судя по изменению длин отрезков 1–2 и 3–4 можно заключить, что верхние волокна балки сжаты, а нижние растянуты. Поскольку деформация волокон меняется непрерывно, на каком-то уровне по высоте полосы существует слой волокон, не изменивших своей длины. Этот слой называют нейтральным слоем. Нейтральный слой — это поверхность, разделяющая сжатую зону балки и растянутую. Нейтральный слой не изменяет при изгибе свою первоначальную длины. На рис. 6.2 нейтральный слой изображен штрихпунктирной линией.

Поскольку в нашем случае балка симметрична относительно плоскости действия внешних сил, постольку обе ее половины деформируются симметрично относительно этой плоскости. Это позволяет предположить, что деформация волокон любого слоя, параллельного нейтральному, не зависит от их положения по ширине балки. Повороты сечений происходят вокруг их нейтральных осей. Поскольку сечения поворачиваются вокруг нейтральных осей, перпендикуляр-



ных к плоскости действия сил, точки этой плоскости останутся в ней и после деформации; следовательно, ось балки останется в плоскости действия сил, обратившись в плоскую кривую. Изгиб, при котором ось балки после деформации остается в плоскости действия внешних сил, называется плоским изгибом.

Можно сделать вывод, что при анализе чистого изгиба балки, симметричной относительно плоскости внешних сил, справедлива гипотеза плоских сечений.

Деформации балки в направлении ее ширины протекают так, что волокна ее испытывают обычное растяжение или сжатие, при котором имеет место явление, учитываемое в соответствии с коэффициентом Пуассона; в сжатой зоне ширина сечения балки увеличивается, в растянутой — уменьшается. Изменение поперечного сечения заготовки тем больше, чем меньше радиус изгиба. Это происходит вследствие того, что пластическая деформация в окружном направлении в соответствии с условием несжимаемости сопровождается деформациями обратного знака в одном или двух взаимно перпендикулярных направлениях: радиальном и аксиально.

Напряженное и деформированное состояние при пластическом изгибе зависит от формы и размеров поперечного сечения исходных заготовок. В этом отношении следует различать узкие заготовки, у которых ширина соизмерима с толщиной, и широкие заготовки, у которых ширина несоизмеримо больше толщины. К первому типу относятся гнутые детали из полос и профилей, ко второму — детали из листового материала.

Введем цилиндрическую систему координат  $\rho, \theta, z$  (рис. 6.3). Координата  $\rho$  указывает положение рассматриваемой частицы металла в радиальном направлении, координата  $\theta$  — в окружном (тангенциальном) направлении. Координата  $z$  направлена параллельно ширине заготовки (перпендикулярно плоскости чертежа).

Поскольку перерезывающие силы отсутствуют, можно считать направления осей  $\rho, \theta, z$  главными, тогда напряжения  $\sigma_\rho, \sigma_\theta, \sigma_z$  являются главными нормальными напряжениями. Таким образом, напряженное состояние характеризуется нормальными напряжениями  $\sigma_\theta$  в окружном направлении и нормальными напряжениями  $\sigma_\rho$  в радиальном направлении, которые возникают вследствие нажатия продольных слоев заготовки друг на друга, и нормальными напряжениями  $\sigma_z$  в аксиальном направлении (в направлении оси  $z$ ).



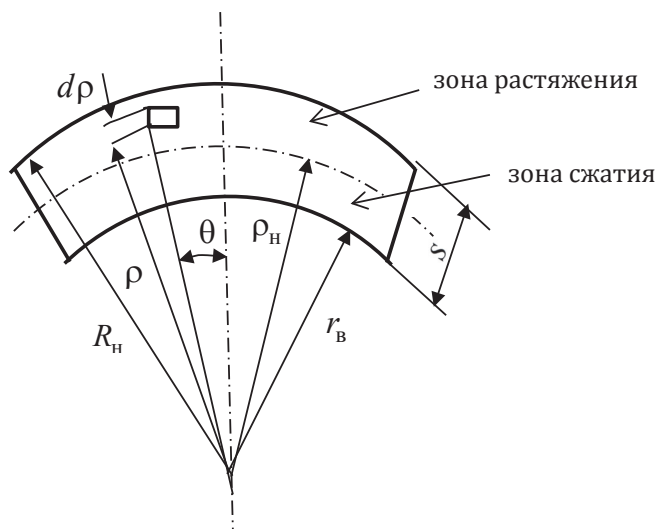


Рис. 6.3. Расчетная схема гибки моментом широкой полосы

Деформированное и напряженное состояния узкой и широкой полосы будут разными. Деформированное состояние узкой полосы (рис. 6.4, б) объемное как в растянутой зоне, так и в сжатой. Меняются только направления деформаций при переходе из зоны растяжения в зону сжатия. Напряженное состояние плоское, поскольку присутствуют только два главных напряжения  $\sigma_\rho$  и  $\sigma_\theta$ . В растянутой части заготовки  $\sigma_\theta$  растягивающее, а в сжатой части — сжимающее. Напряжение  $\sigma_\rho$ , как в растянутой, так и в сжатой части является сжимающим.

Необходимо отметить, что и при гибке узкой полосы имеются аксиальные напряжения  $\sigma_z$ , но они малы по сравнению с напряжением текучести, поэтому ими можно пренебречь. Это допущение и позволяет считать, что при гибке узкой полосы на ребро напряженное состояние плоское.

При гибке широкой полосы деформированное состояние плоское (рис. 6.4, а). Отсутствует компонента  $\epsilon_z$ , поскольку деформации в направлении оси  $z$  (аксиальные деформации) испытывают сопротивление соседних, непосредственно примыкающих к элементарному участку слоев металла. В связи с этим в широкой полосе возникают нормальные напряжения  $\sigma_z$  в направлении оси  $z$  (аксиальные напряжения). В зоне растяжения эти напряжения растягивающие, а в зоне сжатия — сжимающие. Таким образом, напряженное состояние широкой полосы объемное как в растянутой зоне, так и в сжатой.

По мере увеличения хода  $H$  пуансона, при гибке происходит сначала упругая деформация заготовки, затем упругопластическая, когда часть заготовки деформируется упруго, а другая часть пластически, и, наконец, вся заготовка по всей толщине деформируется пластически. В связи с этим различают упругий изгиб, упругопластический и пластический.

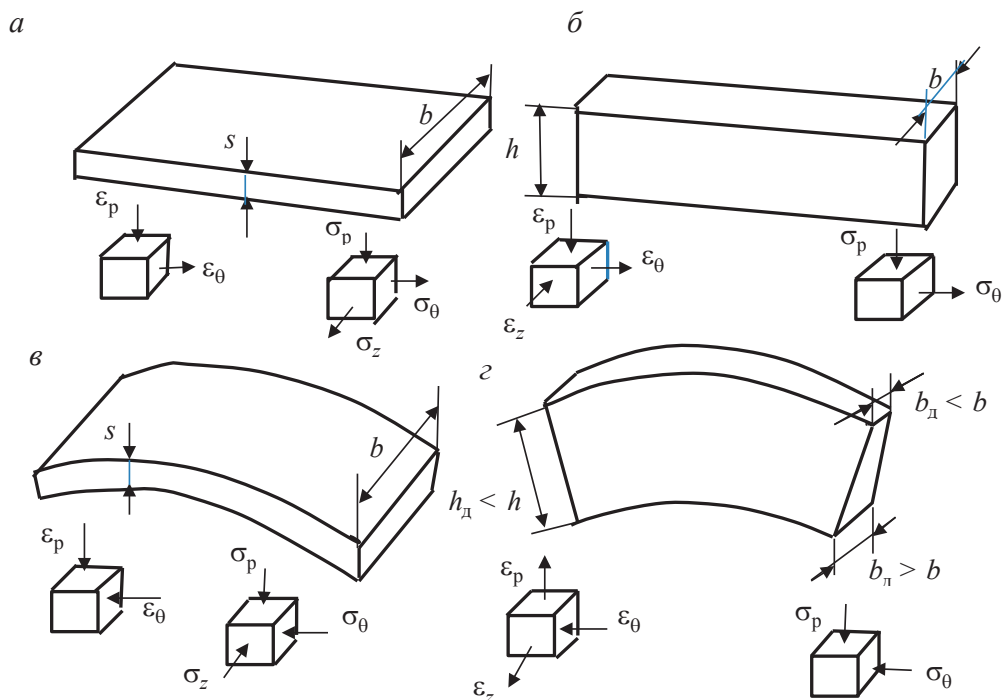


Рис. 6.4. Схема гибки широкой (а) и узкой полосы (б) и напряженно-деформированное состояние в растянутой (в) и сжатой (з) областях полос

Как показано выше, при изгибе широкой полосы  $\epsilon_p \neq 0$ ;  $\epsilon_\theta \neq 0$ ;  $\epsilon_z = 0$ . Таким образом, в этом случае имеем плоскодеформированное состояние. Будем считать, что размер изгибаемой заготовки в направлении, перпендикулярном чертежу, равен единице. Напряжение  $\sigma_z$ , действующее в направлении, в котором деформация равна нулю  $\epsilon_z = 0$ , является средним, равным полусумме других главных напряжений  $\sigma_p$  и  $\sigma_\theta$ ,

$$\sigma_z = \frac{\sigma_p + \sigma_\theta}{2}. \quad (6.1)$$

Выделим, как показано на рис. 6.3, простейший элемент с координатами  $\rho$  и  $\theta$ . Уравнение равновесия для элемента, выделенного в очаге деформации с учетом того, что напряжения  $\sigma_\rho$  вызывают надавливание слоев друг на друга, может быть записано в цилиндрической системе координат в виде

$$\frac{\rho d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho - \sigma_\theta = 0. \quad (6.2)$$

Напряжение  $\sigma_\rho$  является сжимающим (отрицательным), в то время как напряжение  $\sigma_\theta$  положительно в тангенциальном направлении в растягиваемой зоне и отрицательно в зоне тангенциального сжатия.

Уравнение пластичности может записано по гипотезе максимальных касательных напряжений в виде

$$\sigma_\rho - \sigma_\theta = \pm \sigma_s, \quad (6.3)$$

где знак «минус» относится к зоне растяжения в тангенциальном (окружном) направлении, а знак «плюс» — к зоне сжатия в окружном направлении.

При совместном решении уравнений (6.2) и (6.3) и использовании граничных условий, согласно которым  $\sigma_\rho = 0$  при  $\rho = R_n$  и  $\rho = R_b$ , получим формулы, показывающие распределение напряжений по толщине (по  $\rho$ ):

- для зоны растяжения

$$\begin{aligned} \sigma_\rho &= -\sigma_s \ln \frac{R_n}{\rho}, \\ \sigma_\theta &= \sigma_s \left[ 1 - \ln \frac{R_n}{\rho} \right]; \end{aligned} \quad (6.4)$$

- для зоны сжатия

$$\begin{aligned} \sigma_\rho &= -\sigma_s \ln \frac{\rho}{r_b}, \\ \sigma_\theta &= -\sigma_s \left[ 1 + \ln \frac{\rho}{r_b} \right]. \end{aligned}$$

Из формул (6.4) следует, что напряжения  $\sigma_\rho$  возрастают по абсолютной величине по мере удаления от поверхности заготовки в ее толщину.

На некоторой поверхности с радиусом  $\rho_n$ , напряжения  $\sigma_\rho$  для зон растяжения и сжатия становятся равными, и вблизи этой поверхно-

сти происходит смена знаков окружных деформаций и напряжений. Эту поверхность, отделяющую зону окружного растяжения от зоны окружного сжатия в данный момент деформирования, называют нейтральной поверхностью напряжений.

Значение радиуса  $\rho_n$  — радиуса нейтральной поверхности напряжений — можно определить, приравняв значения  $\sigma_\rho$  для зон растяжения и сжатия при  $\rho = \rho_n$  из формул (6.4). После этих преобразований имеем

$$\rho_n = \sqrt{R_n r_b} = r_b \sqrt{1 + \frac{\alpha s}{r_b}}. \quad (6.5)$$

Из формулы (6.5) видно, что нейтральная поверхность напряжений при уменьшении внутреннего радиуса  $r_b$  смещается от срединной поверхности к внутренней и при  $r \rightarrow 0$  выходит на внутреннюю поверхность так, что почти на всю толщину заготовки распространяется зона окружного растяжения.

Нейтральные слои напряжений и деформации обычно не совпадают.

Радиальное напряжение  $\sigma_\rho$  достигает по абсолютному значению максимальной величины на нейтральной поверхности напряжений при  $\rho = \rho_n$ . Подставляя из формулы (6.5) значение  $\rho_n$  в формулу (6.4), характеризующую распределение  $\sigma_\rho$  по толщине заготовки, получаем

$$\sigma_\rho = -\sigma_s \sqrt{\frac{R_n}{r_b}} = -\sigma_s \sqrt{1 + \frac{s}{r_b}}.$$

Из полученной формулы следует, что при  $r_b > 5s$  абсолютное значение  $\sigma_{\rho_{\max}} < 0,1\sigma_s$  и влиянием  $\sigma_\rho$  на условия деформирования можно пренебречь. В этом случае допустимо считать, что при изгибе справедлива линейная схема напряженного состояния (рис. 6.5), при которой эпюра напряжений  $\sigma_\theta$  прямолинейна, а  $\rho_n = \rho_{cp}$ , т. е. радиус нейтральной линии совпадает с радиусом срединной поверхности заготовки.

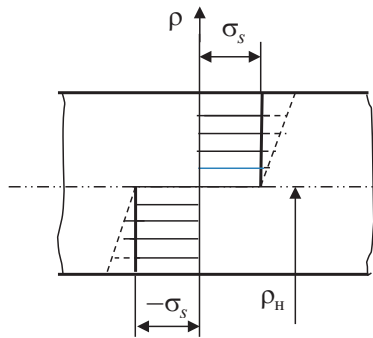


Рис. 6.5. Эпюры напряжений при линейной схеме напряженного состояния при  $r_B > 10s$ : сплошная линия — без упрочнения; прерывистая — с упрочнением

Напряжения  $\sigma_z$ , действующее по ширине изгибаемой заготовки, в этом случае определяются из соотношения (6.1). Если в это соотношение подставить значения  $\sigma_\rho$  и  $\sigma_\theta$  из формул (6.4), то можно оценить распределение напряжений  $\sigma_z$  по толщине заготовки:

- для зоны растяжения

$$\sigma_z = \frac{1}{2} \sigma_s \left( 1 - 2 \ln \frac{R_H}{\rho} \right);$$

- для зоны сжатия

$$\sigma_z = \frac{1}{2} \sigma_s \left( 1 + 2 \ln \frac{\rho}{r_B} \right). \quad (6.6)$$

Как следует из приведенных формул, знаки напряжений  $\sigma_z$  в зонах растяжения и сжатия различны (совпадают со знаками напряжений  $\sigma_\theta$ ). На нейтральной поверхности напряжений при  $\rho = \sqrt{R_H r_B}$  напряжения  $\sigma_z$ , как и напряжения  $\sigma_\theta$  при отсутствии упругодеформированной зоны, скачком изменяют свои знаки и значения. Разный знак напряжений  $\sigma_z$  указывает на то, что элементарные силы, образованные напряжениями  $\sigma_z$ , создают момент, стремящийся изменить кривизну заготовки по ее ширине. В то же время ее краевые участки свободны от внешних нагрузок и могут получать поперечный прогиб под действием напряжений  $\sigma_z$ . Таким образом, напряжения  $\sigma_z$  при изгибе широкой полосы возрастают от нуля на краю заготовки до значений, установленных по формулам (6.6), на определенном удалении от края.

Как следствие отмеченного явления, при изгибе широкой полосы имеет место поперечный изгиб заготовки. При гибке моментом часть заготовки по толщине испытывает окружное растяжение, а другая ее

часть — окружное сжатие. В связи с этим, при снятии внешних нагрузок, растянутые слои стремятся сократить свою длину, а сжатые — увеличить. Благодаря этому угол между нормальными к срединной поверхности будет изменяться. Явление изменения угловых размеров и радиусов кривизны при снятии деформирующих нагрузок называется пружинением.

Изгибающий момент, необходимый для гибки, определяется как сумма моментов, создаваемых в зонах растяжения и сжатия окружными напряжениями  $\sigma_\theta$  относительно центра кривизны заготовки.

$$M^c = b \int_{\rho_0}^{R_H} \sigma_\theta^p \rho d\rho + b \int_{R_B}^{\rho_0} \sigma_\theta^c \rho d\rho, \quad (6.7)$$

где  $b$  — ширина заготовки.

Учитывая, что напряжения  $\sigma_\theta$  постоянны по толщине заготовки и  $\sigma_\theta = \sigma_s$ , как это показано на рис. 6.6, величина изгибающего момента  $M$  определится из соотношения:

$$M = b \int_{r_B}^{R_H} \sigma_s \rho d\rho = \frac{1}{4} b \sigma_s s^2. \quad (6.8)$$

С учетом переменного коэффициента  $\beta = 1 \dots 1,15$  (коэффициент Лоде, учитывающий влияние среднего напряжения на условие перехода металла в пластическое состояние, который достигает наибольшего значения при плоском деформированном состоянии) формула (6.8) будет иметь вид

$$M = \frac{\beta b \sigma_s s^2}{4} = 1,5\beta W \sigma_s,$$

где  $W$  — момент сопротивления поперечного сечения заготовки.

На стадии объемного чисто пластического изгиба нормальные напряжения  $\sigma_\theta$  переменны по толщине заготовки и нейтральная поверхность смещена в сторону сжатых волокон, однако изгибающий момент остается неизменным и определяется по формуле (6.8).

Таким образом, вид напряженного состояния очага деформации при гибке, как и смещение нейтральной поверхности, не оказывает влияния на значение изгибающего момента.

При упругопластическом изгибе по большому радиусу кривизны, изменение напряжений по толщине можно представить в виде эпюры (рис. 6.6).

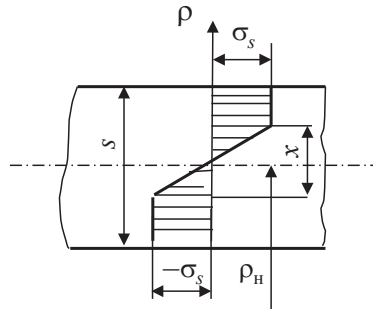


Рис. 6.6. Эпюра напряжений при упругопластическом изгибе

Изгибающий момент в этом случае определяется как сумма моментов, которые действуют в упругой и пластической зонах,

$$M = M_y + M_{пл} = \frac{bs^2}{12} \beta \sigma_s \left[ 3 - \left( \frac{x}{s} \right)^2 \right], \quad (6.9)$$

где  $x$  — толщина упругодеформированного центрального слоя заготовки.

Из формулы (6.9) видно, что при  $x = 0$  формула (6.9) переходит в формулу (6.8), справедливую для случая, когда пластической деформацией охвачена вся толщина заготовки. При  $x = s$  формула (6.9) переходит в формулу для определения изгибающего момента, когда вся заготовка находится в упругом состоянии и лишь в поверхностных слоях окружное напряжение  $\sigma_\theta$  достигает напряжения текучести. Используя закон Гука, можно связать толщину упругодеформированного слоя с радиусом кривизны срединной поверхности заготовки по выражению

$$\frac{x}{2\rho_{cp}} = \frac{\sigma_s}{E}.$$

Подставив значение  $x$  из полученного выражения в формулу (6.8), можно получить формулу, связывающую величину изгибающего момента с радиусом кривизны срединной поверхности заготовки,

$$M = \frac{bs^2}{12} \beta \sigma_s \left[ 3 - \left( \frac{2\rho_{cp}\sigma_s}{sE} \right)^2 \right].$$

Полученная формула показывает, что зарождение пластических деформаций в поверхностных слоях заготовки зависит от отношения напряжения текучести к модулю упругости и начинается при

$\rho_{\text{ср}} \cong (300 \dots 500)s$ . Толщина пластических зон быстро увеличивается по мере уменьшения радиуса кривизны срединной поверхности.

Расчеты по формуле (6.9) позволяют установить, что даже при  $\rho_{\text{ср}} \leq 50s$  толщина упругодеформированного слоя меньше  $0,1s$ , а изгибающий момент отличается от момента, определенного по формуле (6.9), менее чем на 1 %.

Большие пластические деформации определяются истинными или логарифмическими деформациями по формуле

$$e = \ln \frac{\rho}{\rho_{\text{н}}}.$$

Кривая упрочнения при изгибе при аппроксимации ее прямой линией в координатах напряжение — истинные (логарифмические) деформации записывается в следующем виде:

$$\sigma_s = \sigma_{\text{то}} \pm \Pi \ln \frac{\rho}{\rho_{\text{н}}},$$

где  $\Pi$  — средний модуль упрочнения, определяемый при статических испытаниях материала заготовки на растяжение,  $\Pi = \frac{\sigma_{\text{в}}}{(1 - \psi)^2}$ . Здесь

$\sigma_{\text{в}}$  — временное сопротивление (предел прочности материала);  $\psi$  — относительное сужение.

Формулы, характеризующие распределение напряжений  $\sigma_{\theta}$  и  $\sigma_{\rho}$  по толщине заготовки при гибке моментом с учетом упрочнения, получаются из решения уравнения равновесия (6.2) совместно с условием пластичности, которое в этом случае имеет вид

$$\sigma_{\theta} - \sigma_{\rho} = \pm \beta \sigma_s = \beta \left[ \sigma_{\text{то}} \pm \Pi \ln \frac{\rho}{\rho_{\text{н}}} \right],$$

где  $\sigma_{\text{то}}$  — экстраполированный предел текучести,  $\sigma_{\text{то}} = \frac{\sigma_{\text{в}}(1 - 2\psi)}{(1 - \psi)^2}$ .

Подставляя эти формулы в уравнение (6.7), получим формулу для определения изгибающего момента при гибке с учетом упрочнения, которая имеет вид

$$M = \beta b \left[ \sigma_s \left( \frac{R_{\text{н}} - r_{\text{в}}}{2} \right)^2 + \Pi \left( \frac{R_{\text{н}}^2 - r_{\text{в}}^2}{4} \ln \sqrt{\frac{R_{\text{н}}}{r_{\text{в}}}} - \frac{R_{\text{н}}^2 - r_{\text{в}}^2}{8} \right) \right],$$



при  $\Pi = 0$  она превращается в формулу (6.8), полученную для неупрочняющихся материалов.

Мы рассмотрели случай гибки широкой полосы из листа. На практике гибке подвергается не только листовая заготовка, но и трубы и разные профили. Общая формула для определения изгибающего момента для всех случаев, включая и листовую заготовку, приведена ниже:

$$M = \chi_0 EI_{\text{упр}} + \chi_0^n K_n I_{\text{пл}}, \quad (6.10)$$

где  $\chi_0$  — кривизна нейтрального слоя;  $E$  — модуль упругости материала заготовки;  $I_{\text{упр}}$  — момент инерции упругодеформированной зоны сечения относительно нейтральной оси,  $I_{\text{упр}} = \int_{(F_{\text{уп}})} dF y^2$ ;  $n$  — коэффициент

деформационного упрочнения;  $K_n$  — приведенный модуль, зависящий от компонент напряженного состояния;  $I_{\text{пл}}$  — приведенный момент инерции пластически деформированных зон поперечного сечения относительно нейтральной оси,  $I_{\text{пл}} = \int_{(F_{\text{пл}})} dF y^{n+1}$ . Кривая упроч-

нения, полученная при стандартных испытаниях материала заготовки на растяжение, аппроксимируется степенной функцией  $\sigma = K \varepsilon^n$ . Соотношения для определения величин, входящих в формулу (6.10) и алгоритм их определения приведен в работе [11].

### 6.3.2. Упругие деформации при гибке. Пружинение при свободной гибке

Пластический изгиб, как и другие виды пластической деформации, сопровождается упругими деформациями. При свободной гибке часть заготовки по толщине испытывает окружное растяжение, а другая ее часть — окружное сжатие. При снятии внешних нагрузок растянутые слои стремятся сократить свою длину, а сжатые — увеличить. Это вызывает изменение формы и размеров заготовки — радиуса кривизны и угла между прямолинейными участками заготовки, поскольку при разгрузке слои заготовки, находящиеся в зоне растяжения, вследствие упругой деформации укорачиваются, а слои, находящиеся в зоне сжатия, удлиняются. Изменение значений углов и радиусов при разгрузке может быть значительным и зависит от многих факторов. Явление

изменения угловых размеров и радиусов кривизны при снятии деформирующих нагрузок называют пружинением.

Разноименные упругие деформации в зонах растяжения и сжатия вызывают поворот поперечных сечений заготовки на угол, который называется углом пружинения  $\Delta\alpha$ , который представляет разность между остаточным углом детали  $\alpha_d$  и углом изгиба  $\alpha$  (рис. 6.7)

$$\Delta\alpha = \alpha_d - \alpha. \quad (6.11)$$

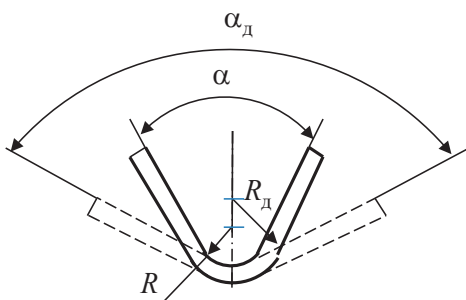


Рис. 6.7. Схема пружинения при гибке

Величину остаточной (пластической деформации), которая остается после снятия внешних нагрузок и обуславливает точность размеров отштампованных деталей, можно определить на основе использования теоремы А. А. Ильюшина о разгрузке. Согласно теореме разгрузка происходит по закону Гука, и если тело при нагружении испытывало неоднородную деформацию, то при разгрузке в нем возникнут остаточные напряжения, которые определяются разностью между напряжениями, действующими в нагруженном теле, и фиктивными напряжениями, которые возникли бы в теле при упругом деформировании той же кривизны [5].

В соответствии с решением имеем:

$$\frac{1}{R_d} = \frac{1}{R} - \frac{M}{EI}, \quad (6.12)$$

где  $R_d$  — радиус изгиба детали после снятия нагрузки, м;  $R$  — радиус изгиба детали под нагрузкой, м;  $M$  — изгибающий момент, действующий в рассматриваемом сечении при пластической деформации;  $E$  — модуль упругости, МПа;  $I$  — момент инерции заготовки ( $I = \frac{bs^2}{12}$  для

прямоугольного сечения шириной  $b$  и толщиной  $s$ , м;  $I = \frac{\pi d^4}{64}$  для заготовки круглого сечения диаметром  $d$ , м).

Уравнение (6.11) позволяет определить радиус кривизны  $\rho_d$  детали после снятия нагрузки, и исходя из условия, что при разгрузке длина волокна на нейтральной поверхности заготовки не изменяется, т. е.

$$\rho_n \alpha = \rho_d \alpha_d,$$

можно найти угол изгиба  $\alpha_d$  детали после снятия нагрузки. Зная угол изгиба  $\alpha_d$ , из уравнения (6.12) можно найти угол пружинения  $\Delta\alpha$

$$\Delta\alpha = \left(1 - \frac{\rho_d}{\rho_n}\right) \alpha = \frac{M \rho_n}{EI} \alpha. \quad (6.13)$$

При изгибе полосы моментом  $\frac{1}{\rho_{\text{разгр}}} = \frac{3\sigma_s}{Es}$  и после преобразований получаем из выражения (6.13) формулу для определения угла пружинения

$$\Delta\alpha = \frac{3\sigma_s}{E} \left[ \frac{r}{s} + 0,5 \right] \alpha. \quad (6.14)$$

На основе теоремы о разгрузке формула для определения угла пружинения при свободной гибке с учетом влияния упрочнения имеет вид

$$\Delta\alpha = 2 \arcsin \left( E^* \xi_n^{1-n} \sin \frac{\alpha}{2} \right), \quad (6.15)$$

где  $E^*$  — коэффициент, учитывающий упрочнение материала заготовки, зависящий от свойств деформируемого материала,  $E^* = \frac{3(1+n)K_n}{2^n(2+n)nE}$ .

Здесь  $n$  — коэффициент деформационного упрочнения;  $K_n$  — приведенный модуль, зависящий от компонент напряженного состояния.

$\xi_n$  — относительный радиус кривизны нейтрального сечения,  $\xi_n = \frac{\rho_n}{s}$ ;

$\alpha$  — угол изгиба. Кривая упрочнения, полученная при стандартных испытаниях материала заготовки на растяжение, аппроксимируется степенной функцией  $\sigma = K\varepsilon^n$ .

Формулы (6.14) и (6.15) дают возможность решать прямую технологическую задачу — находить угол пружинения  $\Delta\alpha$  по известным значе-

ниям угла изгиба и радиуса кривизны  $\rho_n$  нейтральной линии, созданных в процессе гибки. В литературе и справочниках имеются и другие формулы, а также диаграммы для определения величины пружинения при свободной гибке различных металлов и сплавов.

Анализ формул показывает, что угол пружинения при свободной гибке зависит от пластичности металла, толщины заготовки, угла изгиба и радиуса кривизны, на которые произведена деформация. Чем меньше коэффициент деформационного упрочнения  $n$  и относительный радиус  $\xi_n$  кривизны, тем меньше угол пружинения. Чем пластичнее материал заготовки, тем меньше угол пружинения. Упрочнение повышает предел текучести материала и снижает пластичность, поэтому наклепанный металл пружинит больше, чем отожженный.

В табл. 6.1 приведены формулы для расчета углов пружинения для мягкой стали при свободной V-образной гибке стальных деталей, а в табл. 6.2 — углы пружинения при свободной V-образной гибке деталей из разных металлов [3].

Таблица 6.1

Угол пружинения при V-образной гибке стальных деталей

Сталь	Угол гибки, град			
	30	60	90	120
Ст 4, 25 и 30	1,59 ( $r/s$ )-1,03	0,96 ( $r/s$ )-0,94	0,78 ( $r/s$ )-0,79	0,46 ( $r/s$ )-1,36
Ст 1, 1,08кп, 10кп и 10	0,75 ( $r/s$ )-0,39	0,58 ( $r/s$ )-0,80	0,43 ( $r/s$ )-0,61	0,36 ( $r/s$ )-1,26
15, 20, Ст 3	0,69 ( $r/s$ )-0,23	0,64 ( $r/s$ )-0,65	0,434 ( $r/s$ )-0,36	0,37 ( $r/s$ )-0,58

Пружинение искажает форму изделий после гибки и приводит к необходимости дополнительных операций правки. Упругие деформации (пружинение) следует учитывать при расчете размеров инструмента для гибки. Это позволяет устранить трудоемкие операции ручной правки после штамповки.

Если известно значение пружинения, которое характеризуется изменением радиуса гибки  $\Delta r$  и изменением угла гибки  $\Delta \alpha$ , то размеры пуансона и матрицы определяют по следующим зависимостям:

$$r_n = r_d - \Delta r,$$

$$\alpha_n = \alpha_d \pm \Delta \alpha.$$

Таблица 6.2

**Угол пружинения при свободной V-образной гибке деталей из разных металлов**

Материал	Отношение <i>r/s</i>	Толщина материала, мм		
		до 0,8	0,8 до 2	свыше 2
		Углы пружинения, град		
Сталь, $\sigma_{\text{в}}$ до 35 кг/мм <sup>2</sup>	До 1	4	2	0
Латунь, $\sigma_{\text{в}}$ до 35 кг/мм <sup>2</sup>	Свыше 1 до 5	5	3	1
Алюминий, цинк	Свыше 5	6	4	2
Сталь, $\sigma_{\text{в}}$ = 40...50 кг/мм <sup>2</sup> Латунь, $\sigma_{\text{в}}$ = 35...40 кг/мм <sup>2</sup>	До 1	5	2	0
	Свыше 1 до 5	6	3	1
	Свыше 5	8	5	3
Сталь, $\sigma_{\text{в}}$ > 55 кг/мм <sup>2</sup>	До 1	7	4	2
	Свыше 1 до 5	9	5	3
	Свыше 5	12	7	5
Жаропрочная сталь	До 1	—	1	—
	Свыше 1 до 5		4	
	Свыше 5		5	
Сталь 30ХГСА	До 2	—	2	—
	Свыше 1 до 5		4,5	
	Свыше 5		8	
Дуралюмин Д16	До 2 Свыше 2 до 5 Свыше 5	Отожженный	Нагартованный	
		2	4,5	
		4	8,5	
		6,5	14	

Радиус  $r_n$  на пуансоне, изготавливаемый с тем, чтобы получить на детали требуемый угол распружинения, можно рассчитать по формуле

$$r_n = \frac{2r}{\sqrt{1 + \frac{4A}{s}r + 1}},$$

где  $A$  — коэффициент, его значения ( $A \times 100$ ) приведены ниже.

Алюминий .....	0,1	Сталь 20 .....	0,30
Дуралюмин Д16М .....	0,7	Сталь 40 .....	0,52
Дуралюмин Д16Т .....	2,60	Сталь 65 Г отоженная .....	0,76
Латунь Л62 мягкая .....	0,48	Сталь нержавеющая нагартованная .....	1,80
Бронза БрОФ .....	1,50	Сталь нержавеющая раздирочная .....	0,44

### 6.3.3. Деформирующее усилие при свободной гибке

Усилие при свободной гибке необходимо знать для определения потребной мощности и выбора соответствующего оборудования для осуществления процесса.

В соответствии со схемой свободной гибки (рис. 6.1) на деформируемую заготовку действует активная сила давления пуансона  $P$ , реакции  $Q$  со стороны матрицы и силы трения  $T$ , возникающие в результате поворота изгибаемой заготовки относительно опор матрицы. Силы трения пропорциональны реакции опор  $T = \mu Q$ . Проектируя все силы на направление действия силы  $P$ , получаем уравнение равновесия в следующем виде:

$$P = 2Q \left( \sin \frac{\alpha}{2} + \mu \cos \frac{\alpha}{2} \right). \quad (6.16)$$

Реакции  $Q$  определяют из условия равенства моментов, создаваемых реакцией  $Q$  и плечом  $l$ , и предельного момента пластического изгиба без учета упрочнения

$$Q = \sigma_s \frac{bs^2}{4l}, \quad (6.17)$$

где  $l$  — длина плеча, равна расстоянию между направлением действия реакции опоры  $Q$  и нормалью, проведенной из центра скругления пуансона к прямолинейному участку изгибаемой заготовки. Длину плеча  $l$  определяют из геометрических соотношений (см. рис. 6.1)

$$l = \left[ \frac{L}{2} - (r_m + r_n + s) \cos \frac{\alpha}{2} \right] \left( \frac{1}{\sin \frac{\alpha}{2}} \right), \quad (6.18)$$

где  $L$  — расстояние между центрами скруглений рабочих кромок матрицы;  $r_m$  и  $r_n$  — радиусы рабочих кромок матрицы и пуансона соответственно.

Подставляя соотношения (6.17) и (6.18) в уравнение (6.16), получаем формулу для определения усилия при свободной гибке

$$P = \frac{\sigma_s bs^2 \left( \sin \frac{\alpha}{2} + \mu \cos \frac{\alpha}{2} \right) \sin \frac{\alpha}{2}}{L - 2(r_1 + r_2) \cos \frac{\alpha}{2}}, \quad (6.19)$$

где  $\sigma_s$  — предел текучести материала заготовки;  $b$  — ширина заготовки;  $s$  — толщина заготовки;  $r_1 = r_n + \frac{s}{2}$  и  $r_2 = r_m + \frac{s}{2}$ .

Усилие гибки изменяется по ходу пуансона в связи с изменением угла  $\frac{\alpha}{2}$  и, следовательно, плеча  $l$ .

Расчеты по формуле (6.19) показывают, что чем больше относительное расстояние  $\frac{L}{r}$  между опорами, тем, при большем значении угла изгиба  $\alpha$ , усилие достигает своего максимума, после чего остается неизменным.

Деформирующее усилие с учетом упрочнения материала заготовки в процессе гибки и аппроксимации кривой упрочнения степенной функцией  $\sigma = K\varepsilon^n$  можно определить по формуле

$$P = \frac{C_p b h}{\xi_n^{1+n}} \left( \mu + \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} \right), \quad (6.20)$$

где  $C_p$  — коэффициент, зависящий от механических свойств материала и ширины изгибаемой заготовки,  $C_p = \frac{nK}{2^n(1+n)(2+n)}$ . Здесь  $n$ ,  $K$  — кон-

станта аппроксимации кривой упрочнения.  $\xi_n$  — относительный радиус кривизны нейтрального сечения;  $\alpha$  — угол изгиба, на который производится деформация заготовки с учетом пружинения материала.

Анализ формулы (6.20) показывает, что усилие гибки зависит от механических свойств металла, поперечного сечения заготовки, радиуса кривизны и угла изгиба, создаваемых в процессе формоизменения. При прочих равных условиях усилие возрастает с увеличением кривизны  $\frac{1}{\rho_n}$ , на которую производится изгиб. Увеличение угла изгиба  $\alpha$

сопровождается уменьшением усилия  $P$ , что объясняется существованием зависимости между геометрическими параметрами формы изгиба  $\alpha$  и  $\rho_n$  и шириной ручья матрицы  $B_m$ .

При данном радиусе кривизны получить большой угол изгиба возможно лишь на матрице с большой шириной ручья, а этому соответствует меньшее усилие формоизменения. Отсюда, при постоянстве радиуса кривизны  $\rho_n$ , увеличение угла изгиба  $\alpha$  сопровождается уменьшением потребного усилия гибки.

### 6.3.4. Геометрические и кинематические параметры формообразующих элементов штампа при свободной гибке

К числу основных геометрических параметров элементов штампа относятся ширина ручья матрицы  $B_m$  и радиус кривизны пуансона  $r_n$ , кинематическим параметром является перемещение пуансона относительно матрицы  $H$  (см. рис. 6.1).

Указанные геометрические и кинематические параметры играют определяющую роль в процессе изготовления деталей заданной формы, поскольку, при свободной гибке в штампах деталей одинарной кривизны, все многообразие их форм создается путем соответствующего прогиба изгибаемой заготовки, а этот изгиб осуществляется перемещением пуансона относительно матрицы. При этом необходимая величина прогиба, а следовательно, и рабочее перемещение пуансона будут зависеть как от создаваемого радиуса кривизны и угла изгиба детали, так и от ширины ручья матрицы, в зоне которого происходит процесс формоизменения.

Таким образом, при свободной гибке возникает три типа технологических задач [11].

Первый тип задач состоит в определении ширины ручья матрицы  $B_m$  радиуса закругления пуансона  $r_n$  и глубины входа его в матрицу  $H$  для получения после разгрузки детали с геометрическими параметрами  $\alpha_d$  и  $R_d$ . В этом случае предварительно вычисляют величину изменения угла изгиба  $\Delta\alpha$  и радиуса  $\Delta R$  вследствие пружинения материала и находят  $\alpha$  и  $R$ , которые необходимо создать в процессе формоизменения.

Второй тип технологических задач, связанных со свободной гибкой, заключается в определении максимально допустимого радиуса пуансона  $r_n$  и величины его хода  $H$  при изготовлении детали с заданным углом изгиба  $\alpha_d$  на матрице с определенной шириной ручья  $B_m$ . Для обеспечения условий свободной гибки, радиус пуансона не должен быть больше минимального радиуса кривизны  $r_n$  нейтрального слоя изогнутой заготовки в ручье матрицы. Отсюда при решении рассматриваемой задачи необходимо определить минимальный радиус кривизны  $r_n$ , который будет иметь заготовка при изгибе ее на матрице с шириной ручья  $B_m$  до угла изгиба  $\alpha$  (с учетом пружинения материала).

Третий тип задач заключается в следующем: известны ширина ручья матрицы  $B_m$  и величина рабочего хода пуансона  $H$ . Требуется опреде-



лить геометрические параметры формы изгиба, которые будет иметь заготовка при данных параметрах оснастки.

Практически решение подобных технологических задач производится с помощью графиков и диаграмм, приведенных в справочниках и работах [3, 7, 8], а также путем проведения соответствующих экспериментов.

### 6.3.5. Гибка в штампах

В производстве наиболее широко выполняют гибку в штампах, установленных на кривошипных и гидравлических прессах. Отличительной особенностью по сравнению со свободной гибкой этого способа является то, что деформируемая заготовка в конце нагружения принимает форму деформирующего инструмента (рис. 6.8).

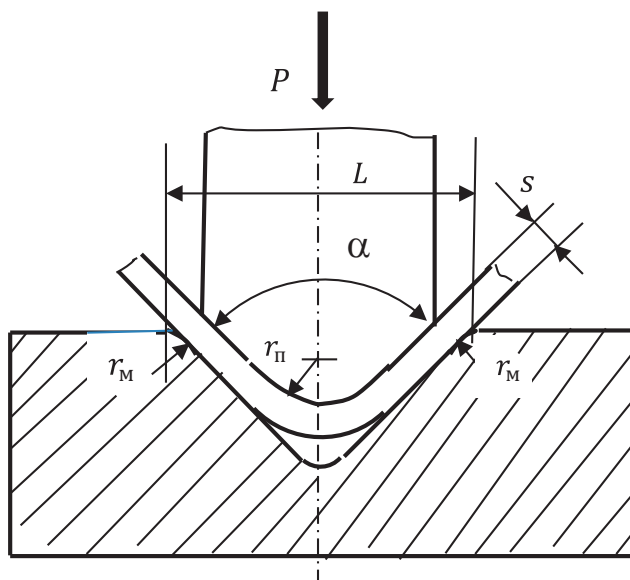


Рис. 6.8. Схема гибки в штампе

По форме полученной детали различают одноугловую, V-образную гибку, двухугловую, или П-образную гибку, Z-образную и другие разновидности гибки.

Гибка в штампах происходит под действием поперечной силы, приложенной к заготовке между опорами. Она осуществляется одновре-

менным действием на заготовку пуансона и матрицы. Закономерности, полученные для изгиба моментом, с известным приближением могут быть использованы и при изгибе поперечной силой, за исключением изгиба на малые радиусы, значения которых соответствуют стадии объемного чисто пластического изгиба.

Гибка в штампе значительно отличается от свободного изгиба [8]. На стадии I одноугловой гибки в штампе, которая начинается после соприкосновения пуансона с заготовкой, происходит свободный изгиб заготовки (рис. 6.9). Радиус изгиба не зависит от соответствующего радиуса пуансона. Стадия I заканчивается в момент, когда полки заготовки становятся касательными к боковым стенкам матрицы. На стадии II центральный участок заготовки, соответствующий радиусу закругления пуансона  $r_{\text{п}}$ , изгибается и полки заготовки отходят от матрицы и касаются пуансона. На стадии III увеличивается кривизна заготовки в зоне радиуса пуансона. Полки заготовки распрямляются боковыми гранями пуансона. Заканчивается стадия III полным прилеганием заготовки к поверхностям пуансона и матрицы и уменьшением длины изгиба плеча. Стадия IV гибки — правка, осуществляемая чеканящим ударом.

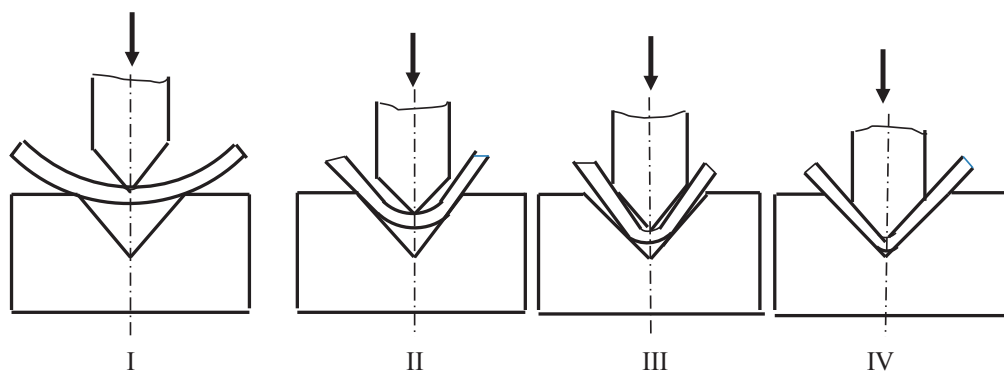


Рис. 6.9. Стадии процесса одноугловой гибки в штампе

Если радиус закругления матрицы  $r_{\text{м}} > r_{\text{п}} + s$ , то на стадии IV происходит правка участка детали в зоне радиуса пуансона. Правкой придается изделию требуемая форма и обеспечивается получение изделия с радиусом равным радиусу пуансона и с прямолинейными полками, а также уменьшение угла пружинения.

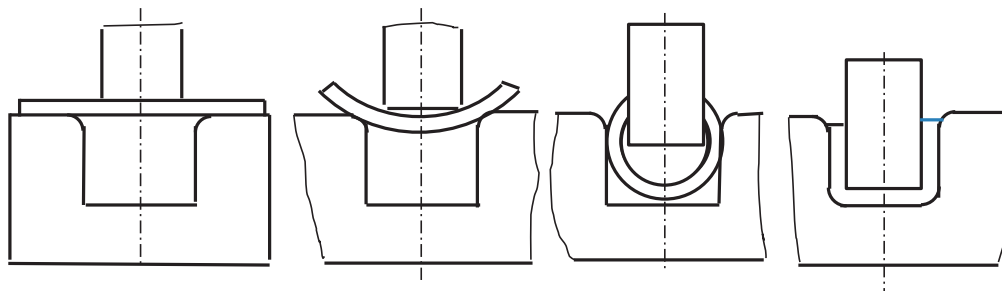


Рис. 6.10. Стадии процесса двухугловой (П-образной) гибки в штампе

При свободной двухугловой гибке (рис. 6.10) заготовка под пуансоном искривляется. При дальнейшем движении пуансона концы заготовки прогибаются вверх до тех пор, пока ее концы не упрутся в боковые грани пуансона. Кривизна заготовки сохраняется до момента касания дна матрицы. При этом угол изгиба меньше  $\frac{\pi}{2}$  на  $\Delta\alpha$ , а радиус изгиба  $r_d$  может быть больше радиуса скругления  $r_n$  рабочей части пуансона. Одновременно происходит изгиб (выпучивание) среднего участка заготовки под торцом пуансона. При дальнейшем пускании пуансона происходит гибка в упор с чеканкой углов.

При свободной двухугловой гибке трудно получить прямые углы. В связи с этим П-образная гибка чаще всего выполняется с прижимом заготовки (рис. 6.11), что предотвращает искривление заготовки под пуансоном и служит также для удаления из матрицы готового изделия.

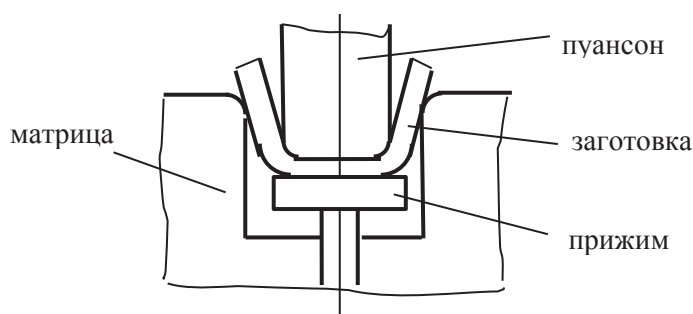


Рис. 6.11. Двухугловая гибка в штампе с прижимом

При гибке в штампах сила  $P$  и реакции опор образуют изгибающий момент, достаточный для выполнения формоизменения. В процессе гибки кривизна деформируемого участка заготовки увеличивается.

Одновременно с этим происходит растяжение внешних и сжатие внутренних слоев. При гибке в штампе так же, как и при свободной гибке моментом, пластические деформации начинаются от поверхностных слоев заготовки. Однако поскольку момент, вызванный опорными силами, является переменным по длине заготовки, вследствие изменения длины плеча, постольку глубина проникновения пластических деформаций в толщину также переменна по длине заготовки. По мере увеличения радиуса изгиба, пластической деформацией охватывается вся толщина заготовки. Форма зоны пластической деформации и ее протяженность при  $\alpha = 90^\circ$  составляют около одной четверти плеча гибки  $l$ .

Различная глубина проникновения зоны пластических деформаций по длине заготовки указывает на то, что кривизна заготовки переменна по длине и изменяется в процессе деформирования. Выражение, устанавливающее связь между радиусом кривизны срединной поверхности и величиной изгибающего момента, можно получить из формулы (6.21)

$$\rho_{cp} = \frac{sE}{2\sigma_s} \sqrt{3 - \frac{12M}{\sigma_s s^2}}. \quad (6.21)$$

В то же время значение момента, переменного по длине, определяется по соотношению

$$M = 2M_l \frac{y}{L},$$

где  $M_l$  — момент, действующий посередине длины заготовки в точке приложения усилия от пуансона;  $y$  — расстояние от опоры до рассматриваемой точки;  $L$  — расстояние между опорами.

Формулу (6.32) можно представить в виде, позволяющем выразить значение радиуса кривизны по длине заготовки, если принять, что максимальный момент, действующий посередине длины заготовки, равен  $M_l = \frac{1}{4}\sigma_s s^2$ , тогда

$$\rho_{cp} = \frac{sE}{2\sigma_s} \sqrt{3 - \frac{6y}{L}}, \quad (6.22)$$

где  $y$  — координата рассматриваемой точки заготовки, направленная по ее длине.

Из формулы (6.22) следует, что  $\sigma_{cp} = \frac{sE}{2\sigma_s}$  при  $y \leq \frac{1}{3}L$ , т. е. части заготовки, находящиеся на указанном расстоянии от опоры, испытыва-

ют только упругие деформации. Пластические деформации возникают в частях заготовки от середины до  $\frac{L}{3}$ . Таким образом, полная протяженность зоны пластической деформации (по обе стороны от точки приложения поперечной силы) будет  $L - \frac{2}{3}L = \frac{1}{3}L$ . Отсюда следует, что, при гибке поперечной силой, пластический изгиб происходит не только в зоне контакта пуансона с заготовкой, но и во внеконтактной зоне, которую условно называют зоной свободного изгиба. В этой зоне радиус срединной поверхности заготовки плавно увеличивается от радиуса  $r_n + \frac{s}{2}$  (где  $r_n$  — радиус скругления рабочего торца пуансона) до радиуса, соответствующего началу появления пластических деформаций в поверхностных слоях заготовки.

Протяженность зоны свободного изгиба зависит от расстояния между опорами при гибке V-образных деталей поперечной силой, а выпрямление зон свободного изгиба (правка полок) приводит к резкому увеличению усилия деформирования, а также существенно сказывается на величине пружинения.

При относительно малых радиусах изгиба, после соприкосновения заготовки с боковыми гранями пуансона (см. рис. 6.10, стадия III), по мере опускания заготовки, происходит одновременное уменьшение радиуса изгиба центральной зоны заготовки и разгибание (правка) ее полок.

Основные технологические задачи, решаемые при проектировании процессов гибки деталей в штампах, следующие:

- определение пружинения при гибке в штампах и учет его влияния на точность технологического процесса;
- выбор рациональных параметров формообразующих элементов штампа и расчет параметров настройки оборудования;
- определение усилия формоизменения и выбор соответствующего оборудования для осуществления процесса.

**Пружинение при гибке в штампах.** Гибку в штампах, как и свободную гибку, сопровождают упругие деформации, вызывающие пружинение, которое искажает форму изделия при разгрузке и непосредственно изменяет кривизну пластически изогнутого элемента.

Представление о величине упругих деформаций, как и при свободной гибке, дает угол пружинения  $\Delta\alpha$ , который представляет разность

между так называемым остаточным углом, т. е. углом загиба детали  $\alpha_d^*$  после разгрузки, и необходимым углом изгиба детали  $\alpha$ ,

$$\Delta\alpha = \alpha_d^* - \alpha.$$

Зная радиус  $R_0$  изделия после пружинения, можно определить угол пружинения по формуле

$$\Delta\alpha = (180 - \alpha) \frac{R_0}{R - 1},$$

где  $R$  — радиус изгиба детали под нагрузкой.

Если гибка производится на обычных штампах по большому радиусу ( $\frac{r}{s} > 10$ ), то корректировка формы гибочного инструмента на пружинение должна быть произведена не только по углу, но и по радиусу. В этом случае пружинение без учета упрочнения металла может быть подсчитано по формулам (6.11) и (6.14), а для гибки с учетом пружинения можно воспользоваться формулой (6.15).

При гибке в штампах, поскольку она сопровождается правкой полок заготовки, учесть влияние пружинения сложнее, т. к. величина пружинения складывается с величиной пружинения полок заготовки. Суммарная величина пружинения зависит от расстояния между опорами и удельного усилия правки. Обычно угол пружинения с правкой меньше, чем при свободной гибке.

При относительно малых радиусах изгиба, после соприкосновения полок заготовки с боковыми гранями пуансона, по мере опускания пуансона, происходит одновременное уменьшение радиуса изгиба центрального участка заготовки и правка (разгибание) полок. После снятия нагрузки в результате упругих деформаций центрального участка, который соприкасается со скругленной кромкой пуансона, угол между полками увеличивается, а в результате спрямления полок — уменьшается. Уменьшение угла между полками носит название отрицательного пружинения. Отрицательное пружинение возрастает с уменьшением радиуса гибки и увеличением расстояния между опорам заготовки.

При одноуголовой гибке, в зависимости от относительного радиуса изгиба  $R_{отн}$ , пружинение может быть положительным, когда происходит увеличение угла изогнутой детали после снятия нагрузки, в этом случае  $\alpha_{и} = \alpha_d^* - \Delta\alpha$ , и отрицательным, когда происходит уменьшение угла изогнутой детали после снятия нагрузки, в этом случае  $\alpha_{и} = \alpha_d^* + \Delta\alpha$ .

( $\alpha_n$  — угол на инструменте). Кроме того, пружинение может отсутствовать, когда  $\Delta\alpha = 0$  и, следовательно,  $\alpha_n = \alpha$ .

При гибке деталей из пластичных материалов, таких как низкоуглеродистые стали, алюминиевые сплавы в отожженном состоянии, латуни с большим содержанием меди, пружинение незначительно. Поэтому для гибки таких деталей корректирование геометрических параметров штампов можно проводить только по углу изгиба, пренебрегая изменениями радиуса.

Для одноугловой гибки экспериментальные и теоретические данные зависимости угла пружинения от относительного радиуса изгиба и других факторов приводятся в справочниках [3, 7, 12]. Для упрощения расчетов построены диаграммы, позволяющие определить угол пружинения  $\Delta\alpha$  по заданному отношению  $\frac{r_0}{s}$  для разных металлов и сплавов.

При двухугловой гибке, при разгрузке, упруго деформируются все элементы детали: средний ее участок, полки и угловые участки.

При гибке П-образных деталей, внеконтактные участки изгиба оказывают влияние на величину угла пружинения. В этом случае на величину угла пружинения влияет зазор между пуансоном и матрицей и подчеканка средней части заготовки. Уменьшение зазора  $z$  приводит к спрямлению полок при протягивании их через матрицу. При этом внеконтактные участки изгиба полок получают деформацию с увеличением радиуса кривизны, что обуславливает возникновение угла пружинения с обратным знаком. Таким образом, с уменьшением зазора общий угол пружинения уменьшается. Аналогично влияет на общий угол пружинения и правка средней части заготовки. Для получения угла пружинения, близкого к нулю (полки параллельны), иногда при правке прибегают к искусственному увеличению обратного изгиба средней части, предусматривая поднутрение в пуансоне и выпуклость в донной части матрицы или на торце выталкивателя.

Величина пружинения при гибке зависит от ряда факторов, основными из которых являются механические свойства и толщина материала детали, радиус гибки, форма детали, тип штампа, способ гибки и др. Чем выше предел текучести изгибаемого металла, модуль упругости металла, чем больше отношение  $\frac{r}{s}$  и меньше толщина  $s$ , тем

больше пружинение при прочих равных условиях. Существенное влияние на величину пружинения оказывает однородность механических

свойств материала. Многообразие форм деталей и факторов, влияющих на величину пружинения, затрудняет создание расчетных формул для всех случаев гибки. Пружинение обычно определяют на основе опытных данных с последующей доработкой рабочих частей штампа.

Невозможность точного определения углов пружинения зачастую требует экспериментальной отладки процесса гибки с корректировкой размеров инструмента для обеспечения заданной точности деталей. В связи с этим в ряде случаев становится рациональной корректировка конструкции детали. В частности, эффективной является штамповка детали с ребрами жесткости, которые препятствует изменению угла между полками, получаемого в процессе штамповки. Одним из способов уменьшения упругих деформаций при гибке двухугловых деталей является уменьшение зазора между пуансоном и матрицей. Угол пружинения существенно уменьшается при гибке в штампах с зазором меньше толщины заготовки ( $z = 0,9s$ ). Однако при этом возникают высокие нормальные давления на инструмент, что приводит к налипанию металла и появлению задиров. Для устранения такого явления применяют эффективные смазочные материалы и хромированный инструмент.

Для компенсации углов пружинения при гибке деталей с небольшими радиусами используют специальные приемы. При гибке деталей с радиусами, близкими к толщине материала заготовки, в целях уменьшения пружинения уменьшают поверхность соприкосновения пуансона с поверхностью заготовки. Рабочую поверхность пуансона делают ступенчатой, а в матрице фрезеруют шлиц. Длина контактной поверхности принимается равной  $\frac{1}{3}$  плеча гибки. При этом правке подвергается только участок заготовки в зоне пластической деформации. При гибке П-образных деталей, пуансон делают с уклоном равным углу пружинения. Торец пуансона и прижима выполняют по радиусу. После снятия нагрузки изогнутая по радиусу часть детали выпрямляется, компенсируя пружинение. Применяют гибку с калибровкой и подчеканкой радиусов. Размеры чеканящих радиусов детали выступов на пуансоне следующие: ширина  $l = r_{\text{п}} + (1,5...2)s$ ; высота  $(0,08...0,1)s$ . При этом односторонний зазор между пуансоном и матрицей равен толщине материала заготовки.



Другой способ уменьшения упругих деформаций заключается в применении специальных машин и штампов. Например, компенсацию углов пружинения при П-образной гибке деталей с высокими полками можно осуществить в штампе с секционной поворотной матрицей.

**Допустимый радиус изгиба.** Важным параметром, который определяет содержание и продолжительность технологического процесса гибки и конструкцию гибочных штампов, является внутренний радиус гибки на детали. Минимально допустимый радиус изгиба зависит от характеристик пластичности и анизотропии материала заготовки, ее толщины, угла изгиба, ширины заготовки, состояния кромок, качества поверхности, способа гибки и прочих факторов.

Минимальный допустимый радиус изгиба определяют из условия сохранения устойчивости периферийных слоев изгибаемой заготовки. При гибке широкой заготовки, потеря устойчивости приводит к появлению трещины в зоне растяжения. При гибке на ребро узкой полосы — к появлению трещины в зоне растяжения или складок в зоне сжатия.

При гибке наружный слой растягивается, деформируясь в условиях линейного растяжения (гибка полосы на ребро) или двухосного растяжения (гибка широкой полосы). Для каждого металла при данной схеме напряженного состояния имеется своя допустимая величина деформации, больше которой начинается разрушение. Известно, что чем больше влияние на процесс деформирования оказывают растягивающие напряжения, тем меньше допустимая величина деформации. Следовательно, при изгибе можно ожидать, что разрушение начнется с наружной поверхности заготовки, где растягивающие напряжения, как и деформации, максимальны.

Деформация  $\varepsilon_0$ , возникающая в наружном слое, определяется радиусами кривизны срединной или внутренней поверхностей заготовки. Если принять, что поворот сечений происходит относительно срединной поверхности заготовки, то величину  $\varepsilon_0$  можно приближенно определить из соотношения

$$\varepsilon_0 = \frac{(r+s)\alpha - \left(r + \frac{s}{2}\right)\alpha}{\left(r + \frac{s}{2}\right)\alpha} = s(2r+s). \quad (6.23)$$

У пластичных металлов разрушению предшествует этап локальной деформации (деформация в шейке при растяжении). При гибке зарождению шейки препятствуют слои, расположенные на удалении от наружного слоя. Они получают меньшие деформации и вследствие этого оказывают сдерживающее влияние на локализацию деформаций в наружном слое. Поскольку при меньших деформациях реализуется только равномерное удлинение, в первом приближении в качестве деформации, соответствующей началу разрушения, можно принять величину не равномерной, а полной деформации до разрыва при испытании на линейное растяжение.

Практика показала, что расчетные значения минимального радиуса изгиба больше соответствуют действительным, если в качестве предельной деформации принимать стандартную характеристику пластичности материала относительное сужение  $\psi = \frac{F_0 - F_{\min}}{F_0}$  до разрыва при испытании на растяжение.

Связь между деформациями растяжения при изгибе и относительным сужением можно описать уравнением

$$\varepsilon_0 = \frac{\psi}{1 - \psi}. \quad (6.24)$$

Учитывая формулу (6.23) и соотношение для  $\psi$ , после преобразований (6.24) получаем

$$\left(\frac{r}{s}\right)_{\min} \geq \frac{1 - 2\psi}{2\psi}. \quad (6.25)$$

Из формулы следует, что чем пластичнее металл, тем меньше может быть принят внутренний радиус на участке изгиба (радиус пуансона). При  $\psi = 0$  (хрупкий материал) изгиб невозможен, т. к. по формуле (6.25)  $r \rightarrow 0$ , а при  $\psi = 0,5$  можно практически осуществить гибку при радиусе скругления рабочей кромки пуансона, равном нулю.

Гибка широкой полосы из изотропного материала происходит в условиях двухосного растяжения. Учитывая этот фактор, можно записать

$$\left(\frac{r}{s}\right)_{\min} \geq \frac{1 - 0,5(1 - \psi_p)^{-0,47}}{(1 - \psi_p)^{-0,47} - 1},$$

где  $\psi_p$  — относительное уменьшение площади поперечного сечения образца до начала образования шейки при испытании на растяжение.

На величину минимального радиуса изгиба оказывает влияние ширина заготовки: чем она больше, тем больше минимально допусти-

мый радиус изгиба. Это объясняется двухосной схемой напряженного состояния, т. к. с увеличением ширины заготовки в зоне растяжения увеличиваются растягивающие напряжения  $\sigma_z$ , действующие по ширине заготовки, при этом пластичность металла снижается. Растягивающие напряжения  $\sigma_z$  распределяются по ширине заготовки неравномерно: у края они равны нулю, а в середине заготовки достигают максимума. В связи с этим трещины при гибке появляются в середине детали, а не по ее краям. Этим же объясняется и появление седловины в зоне изгиба детали.

Наличие упрочнения материала заготовки снижает величину минимально допустимого радиуса изгиба. В связи с этим, когда упрочнение является причиной появления трещин при гибке из-за исчерпания ресурса пластичности материала заготовки, заготовку перед гибкой подвергают нормализации или отжигу, в ряде случаев удаляют упрочненный слой металла зачисткой.

Таким образом, минимальный радиус гибки зависит от механических свойств материала детали, угла гибки, направления линии гибки относительно направления прокатки, состояния кромок изгибаемой заготовки.

Таблица 6.3

**Минимально допустимые относительные радиусы гибки  $r_{\min}^* = \frac{r_{\min}}{s}$  разных металлов**

**для угла гибки 90° [3]**

Металл	Состояние металла			
	отожженный или нормализованный		наклепанный	
	Расположение линии гибки			
	поперек волокон проката	вдоль волокон проката	поперек волокон проката	вдоль волокон проката
1	2	3	4	5
Сталь марок:				
05, 08 кп	—	0,3	0,2	0,5
08, 10; Ст1, Ст2	—	0,4	0,4	0,8
15, 20; Ст3	0,1	0,5	0,5	1,0
25, 30; Ст4	0,2	0,6	0,6	1,2
35, 40; Ст5	0,3	0,8	0,8	1,5
45, 50; Ст5	0,5	1,0	1,0	1,7
55, 60; Ст7	0,7	1,3	1,3	2,0
Сталь нержавеющая	—	—	2,5	6,5

Окончание табл. 6.3

1	2	3	4	5
Медь М1; М2; М3	0	0,2	1,0	2,0
Латунь Л63; Л68	0	0,3–0,4	0,5	0,8
Латунь ЛС59-1	0,2	0,5	0,8	1,4
Мельхиор	0,3–0,6	0,5–1,0	—	—
Алюминий АД, Д1	0	0,3–0,4	0,5	0,8
Дуралюмин мягкий Д1; Д16М	1,0	1,5	1,5	2,5
Дуралюмин закаленный Д16Т	2,0	3,0	3,0	4,0
Магнелиевые сплавы МА1; МФ8	Нагрев до 300° С 2,0                      3,0		В холодном состоянии 7,0–5,0                      9,0–8,0	
Титановые сплавы ВТ1	Нагрев до 300–400° С 1,5                      2,0		В холодном состоянии 3,0                      4,0	
ВТ5	3,0                      4,0		5,0                      6,0	

Минимальные углы гибки, установленные в заводской практике и по экспериментальным исследованиям для разных материалов, в зависимости от перечисленных выше параметров приводятся в справочниках. В табл. 6.3 приведены минимально допустимые относительные радиусы гибки  $r_{\min}^* = \frac{r_{\min}}{s}$  для разных металлов. Минимально допустимые радиусы изгиба назначают лишь в случае крайней конструктивной необходимости, во всех остальных случаях назначают увеличенные на 10–20 % радиусы изгиба по сравнению с минимально допустимым.

**Деформирующее усилие гибки в штампах.** Усилие гибки зависит от большого числа факторов, к которым относятся: форма и размеры поперечного сечения заготовки, характеристики ее механических свойств, расстояние между опорами, радиусы скругления пуансона и рабочих кромок матрицы, условий контактного трения, полноты контакта изгибаемой заготовки с пуансоном и матрицей и др. Учет при определении усилия гибки всех факторов представляет определенные трудности, в связи с чем усилие гибки можно определить лишь приближенно. В литературе и справочниках приводятся разные формулы для определения усилия гибки.

Наиболее просто выводятся соотношения для определения усилия гибки, когда задача сводится к решению случая с балкой (заготовкой),

которая лежит на двух опорах с расстоянием между ними равным  $l_x$  и нагружена посередине усилием  $P$ . Для гибки полосы в одноугловом штампе изгибающий момент будет

$$M = \frac{Pl_x}{4} = W(1,5 + \varepsilon_B)\sigma_B = \frac{bs^2}{6}(1,5 + \varepsilon_B)\sigma_B,$$

откуда усилие гибки для любого положения пуансона

$$P = \frac{4bs^2(1,5 + \varepsilon_B)\sigma_B}{6l_x},$$

где  $b$  — ширина заготовки;  $s$  — толщина заготовки;  $\varepsilon_B$  — относительное удлинение материала заготовки при стандартных испытаниях на растяжение в момент начала образования шеек;  $\sigma_B$  — временное сопротивление разрыву;  $l_x$  — расстояние между опорами.

Расстояние  $l_x$  меняется в результате перемещения краев заготовки при опускании пуансона. В связи с этим наименьшее усилие будет в начале гибки, когда  $l_x = L$ , а наибольшее усилие получается в конце гибки при  $l_x = 2r \sin \frac{\alpha_x}{2}$

$$P = \frac{4bs^2(1,5 + \varepsilon_B)\sigma_B}{6 \cdot 2r \sin \frac{\alpha_x}{2}},$$

где  $\alpha_x$  равен  $\alpha$  — углу на пуансоне.

Поскольку кроме усилия, действующего непосредственно на заготовку, при гибке необходимо преодолевать силу трения между скользящими плоскостями детали и рабочими частями штампа, постольку действительное усилие  $P_{\text{гиб}}$  будет всегда больше на величину силы трения  $P_{\text{тр}} = \mu P$ , где  $\mu$  — коэффициент трения, если принять коэффициент трения с некоторым запасом,  $\mu = 0,3$ , то  $P_{\text{тр}} = 0,3P$  и действительное усилие гибки будет

$$P_{\text{гиб}} = P + P_{\text{тр}} = 1,3P.$$

На рис. 6.12 показано, как изменяется усилие в процессе одноугловой гибки [8].

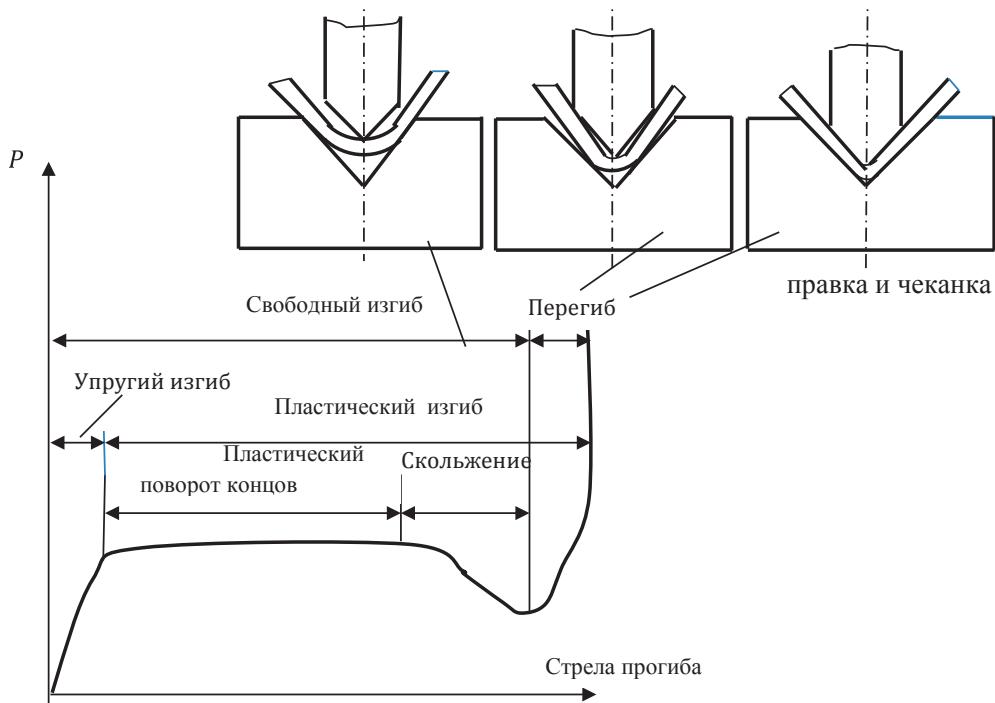


Рис. 6.12. Изменение усилия при одноугловой гибке в зависимости от хода пуансона

Усилие в штампе складывается из усилия свободного изгиба и усилия правки материала. Величина усилия правки значительно превосходит величину свободного изгиба. Конечное усилие гибки с правкой материала для V-образных деталей можно рассчитать по формуле

$$P = k \frac{s^2}{L} B \sigma_{\text{в}} + qF,$$

где  $k = 1,33$  при  $\frac{L}{s} > 8$  и  $k = 1,26$  при  $\frac{L}{s} > 12$ ;  $L$  — расстояние между опорами, мм;  $B$  — ширина изгибаемой детали, мм;  $q$  — удельное давление правки, МПа (табл. 6.4);  $F$  — площадь правки, находящаяся под пуансоном, мм<sup>2</sup>:

$$\text{при } \alpha = 60^\circ F = B[2L - 3,5(r_{\text{п}} + s + R_{\text{м}})];$$

$$\text{при } \alpha = 90^\circ F = B[1,4L - 2(r_{\text{п}} + s + R_{\text{м}})];$$

$$\text{при } \alpha = 120^\circ F = B[1,1L - (r_{\text{п}} + s + R_{\text{м}})].$$

Здесь  $r_{\Pi}$  — радиус гибочного пуансона, мм;  $R_m$  — радиус скольжения матрицы, мм.

Основными факторами, влияющими на усилие гибки, являются отношения  $\frac{r}{s}$ ,  $\frac{L}{s}$ ,  $\frac{L}{r}$ .

Таблица 6.4

Удельное давление правки  $q$ , МПа, в процессе гибки в штампах

Материал детали	Толщина заготовки, мм	Отношение $r/s$			
		1	2	3	5
Сталь 08; 15	1–3	19,6	14,7	11,7	9,8
	3–5	29,4	22,5	19,6	14,7
	5–7	39,2	29,4	24,5	17,6
	7–9	44,12	34,3	21,6	21,6
Сталь Ст3	1–3	24,5	24,5	17,6	11,8
	3–5	39,2	29,4	23,5	17,6
	5–7	44,1	34,3	29,4	21,6
	7–9	49,0	39,2	34,3	29,4

При малом расстоянии между опорами в процессе первой стадии гибки на заготовке могут появиться отпечатки на контактной поверхности с матрицей, поскольку с уменьшением расстояния  $L$  между опорами матрицы (длины паза матрицы) увеличиваются реакции опор. В связи с этим длина паза матрицы должна быть не менее расчетной длины, которая определяется по формуле

$$L \geq \frac{Es^2 \sin \frac{\alpha}{2}}{10\sigma_s r_m} + 2(r_1 + r_2) \cos \frac{\alpha}{2},$$

где  $E$  — модуль упругости материала заготовки;  $s$  — толщина заготовки;  $\alpha$  — угол изгиба;  $\sigma_s$  — предел текучести материала заготовки;  $r_1 = r_{\Pi} + \frac{s}{2}$  и  $r_2 = r_m + \frac{s}{2}$ .

Деформирующее усилие при двухугловой гибке определяется тем, что необходимо изгибать заготовку за один ход прессы одновременно в двух разных сечениях. При этом необходимо учитывать, что внешние силы при такой гибке приложены к заготовке в двух точках контакта ее с пуансоном. Плечо при двухугловой гибке существенно меньше, чем при одноугловой гибке. Кроме того, между боковыми гранями пуансона и матрицы имеется зазор  $z = (1,1 \dots 1,3)s$ , который не изменяется в про-

цессе гибки, а участок заготовки, находящийся под горизонтальной гранью пуансона, отходит от нее и выпучивается (рис. 6.13).

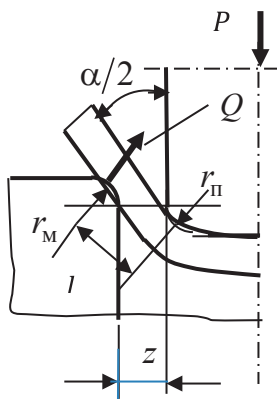


Рис. 6.13. Схема двухугловой гибки

Учитывая приведенные выше особенности двухугловой гибки и проектируя все силы на направление действия силы  $P$ , получаем такое же уравнение равновесия в следующем виде:

$$P = 2Q \left( \sin \frac{\alpha}{2} + \mu \cos \frac{\alpha}{2} \right).$$

Реакции опор  $Q$  определяются из условия равенства моментов, создаваемых реакцией  $Q$  и плечом гибки  $l$ , и предельного момента пластического изгиба без учета упрочнения

$$Q = \sigma_s \frac{bs^2}{4l}.$$

Длина  $l$  плеча гибки, когда скругления рабочих кромок пуансона и матрицы находятся на одном уровне, определится из соотношения

$$l = (r_M + z + r_{\Pi}) \sin \frac{\alpha}{2},$$

где  $r_M$  и  $r_{\Pi}$  — радиусы рабочих кромок матрицы и пуансона соответственно.

После совместного решения представленных выше уравнений, усилие гибки при получении П-образных деталей для полосы с прямоугольным сечением описывается формулой



$$P = \sigma_s \frac{bs^2}{2} \frac{\sin \frac{\alpha}{2} + \mu \cos \frac{\alpha}{2}}{(r_m + z + r_n) \sin \frac{\alpha}{2}},$$

где  $\sigma_s$  — предел текучести материала заготовки;  $b$  — ширина заготовки;  $s$  — толщина заготовки;  $\alpha$  — угол изгиба детали;  $\mu$  — коэффициент трения;  $r_m$  и  $r_n$  — радиусы рабочих кромок матрицы и пуансона соответственно;  $z$  — величина зазора между пуансоном и матрицей.

Если двухугловая гибка ведется в штампе с прижимом средней части заготовки, необходимо преодолеть сопротивление буфера прижимного устройства, которое принимают равным 25–60 % деформирующего усилия гибки, отсюда суммарное усилие будет

$$P_{\text{сум}} = (1,25 \dots 1,60) P.$$

После гибки, для повышения точности, деталь в том же штампе подвергают правке (чеканке). Усилие правки определяют как произведение соответствующего удельного усилия  $q$  правки на площадь контакта  $F_k$  заготовок со штампом при правке

$$P_{\text{пр}} = qF_k.$$

Удельное усилие  $q$  правки при гибке выбирается в зависимости от материала детали и толщины заготовки в пределах 30–150 МПа (табл. 6.5).

Таблица 6.5

**Величина удельного усилия  $q$ , МПа, правки при гибке П-образных деталей в штампах**

Материал изгибаемой детали	Толщина материала $s$ , мм			
	до 3	свыше 3 до 5	свыше 5 до 7	свыше 7 до 10
Сталь 08, 15	20–30	30–50	50–80	80–100
Сталь 20, Ст3, Ст4	30–40	40–60	60–90	90–120
Сталь 25–35	100		150	
Алюминий АД, АД1	30		60	
Латунь Л63	60		100	

Поскольку усилие правки значительно больше усилия гибки, по этому максимальному усилию и подбирают пресс как при одноугловой, так и при двухугловой гибке.

Приведенные выше формулы для определения усилия относятся к изгибу плоской широкой заготовки, материал которой не упрочняется в процессе деформирования. Усилие давления пуансона на заготовку произвольной формы, обеспечивающее изгиб детали по всему контуру матрицы, с учетом упрочнения может быть определено по формуле [11]

$$P = \left( \frac{M\chi_0}{F} \right)^{\frac{n}{1+n}} \left( \frac{3K_n}{2} \right)^{\frac{1}{1+n}} F \left( \cos \frac{\alpha}{2} + \mu \sin \frac{\alpha}{2} \right),$$

где  $M$  — изгибающий момент, зависящий от формы, размеров сечения и кривизны изгиба  $\chi_0$ ;  $F$  — площадь контакта детали с матрицей;  $n$  — коэффициент деформационного упрочнения;  $K_n$  — приведенный модуль, зависящий от компонент напряженного состояния;  $\alpha$  — угол изгиба с учетом пружинения. Кривая упрочнения, полученная при стандартных испытаниях материала заготовки на растяжение, аппроксимируется степенной функцией  $\sigma = K\varepsilon^n$ .

Для прямоугольной формы сечения детали усилие гибки-калибровки

$$P = 2C_{\text{ш}} \frac{bh}{\xi n} \left( \cos \frac{\alpha}{2} + \mu \sin \frac{\alpha}{2} \right),$$

где  $C_{\text{ш}}$  — постоянный для данного металла коэффициент,

$$C_{\text{ш}} = K_n \left[ \frac{1}{2^{n+2}(2+n)} \right]^{\frac{n}{1+n}} \left( \frac{\alpha}{\beta_c} \right)^{\frac{1}{n}}; b, h — ширина и толщина детали; \xi — от-$$

носительный радиус кривизны,  $\xi = \frac{\rho}{h}$ ;  $\alpha$  — угол изгиба с учетом пружинения;  $\beta_c$  — коэффициент, зависящий от формы поперечного сечения, при прямоугольной форме  $\beta_c = \frac{3}{2}$ .

Работа  $A$  (Дж), необходимая для осуществления гибки, рассчитывается по формуле

$$A = \frac{P_{\text{max}} H}{1000},$$

где  $P_{\text{max}}$  — максимальное усилие гибки, Н;  $H$  — величина полного перемещения пуансона в матрицу, мм.

**Технология гибки типовых деталей.** В зависимости от габаритных размеров детали, толщины изгибаемого материала, типа производ-

ства, для гибки в штампах простого действия на универсальных прессах используются инструментальные, упрощенные, универсально-наладочные и универсальные штампы.

Число переходов для гибки детали зависит от ее конструкции и размеров, числа изготавливаемых деталей и требуемой точности. Детали, имеющие простой профиль поперечного или продольного сечения, получают гибкой в один переход. Детали сложного профиля или простого профиля, но требующие гибки в продольном и поперечном сечениях, в зависимости от характера производства, габаритных размеров детали и имеющегося оборудования, изготавливают либо однопереходной гибкой в сложном штампе либо гибкой за несколько операций в простых штампах.

Существует два способа гибки V-образных деталей: свободная гибка (гибка до соприкосновения) и гибка с правкой.

В первом случае процесс гибки заканчивается в тот момент, когда полки изгибаемой заготовки будут параллельны боковым сторонам рабочего профиля матрицы, радиус изгиба будет несколько больше радиуса пуансона и между заготовкой и пуансоном образуется зазор. Во втором способе, при гибке с правкой, процесс гибки заканчивается калибровкой радиуса изгиба по пуансону, когда полки заготовки зажимаются между рабочими плоскостями пуансона и матрицы.

Усилие правки зависит от наладки штампа, жесткости пресса, колебаний толщины материала заготовки.

Выбор способа гибки V-образных деталей зависит от требуемой точности получаемых деталей. Гибка с калибровкой более качественная, поэтому она имеет большее распространение, чем свободная гибка.

При свободной гибке точность радиуса и угла изгиба на детали зависит от ширины зева  $L$  матрицы и механических свойств изгибаемого металла. Путем подбора величины зева  $L$  можно получить заданный радиус близким к радиусу пуансона.

При гибке с калибровкой весьма важен правильный выбор конструкции штампа. Если к прямолинейности полок не предъявляются повышенные требования, то размеры рабочей полости матрицы можно рассчитать по следующим формулам [8].

Радиус матрицы находится из соотношения

$$r_m = (0,6 \dots 0,8)(r + s),$$

где  $r$  — радиус пуансона;  $s$  — толщина детали.

Размер зева (ширина)

$$L = 2b \sin \frac{\alpha}{2},$$

где  $b$  — ширина заготовки;  $\alpha$  — угол изгиба.

Радиус  $r$  пуансона обычно берется по детали, но не менее данных из табл. 6.3.

Глубина матрицы  $h$  при известной ширине  $b$  может быть рассчитана по формуле

$$h = b \cos \frac{\alpha}{2} - (r + s) \left( \frac{1}{\sin \frac{\alpha}{2}} - 1 \right)$$

или взята в зависимости от толщины  $s$  материала

$s$ .....	до 1.....	1–2.....	2–3.....	3–4.....	4–5.....	5–6.....	6–7.....	7–10
$h$ .....	4.....	7.....	12.....	15.....	18.....	22.....	25.....	30

Если полки детали должны быть прямолинейными, необходимо полное перекрытие изгибаемой заготовки рабочими гранями пуансона.

В зависимости от соотношения размеров полков получаемой детали применяют разные схемы рабочих частей штампов. В частности, при гибке малогабаритных деталей сложной формы, у которых величина опорной поверхности недостаточна для надежного прижима и короткие участки сочетаются с длинными участками, штампы снабжают складной матрицей. Такая матрица состоит из двух шарнирно соединенных пластин.

Изготовление различных скоб (П- и U-образных деталей), у которых допускается наличие выпуклостей средней полки, производят на штампах без прижима со сквозной матрицей и на штампах с прижимом-выталкивателем, когда средняя полка должна быть прямолинейной. Штампы с прижимом имеют широкое применение.

Для деталей с высокими полками применяют пуансоны с поднутрением (рис. 6.14, а). Угол поднутрения  $\beta$  принимают равным  $2-4^\circ$ . Зазор между матрицей и пуансоном делают равным наименьшей толщине изгибаемой детали с тем, чтобы полки детали, зажимаясь между пуансоном и матрицей, поворачивались и охватывали пуансон. После гибки, в результате распружинения, боковые полки становятся вертикальными.

Для упругих материалов используют гибку с обратным выгибом дна, что достигается приданием соответствующей формы прижиму-выталкивателю (рис. 6.14, б). Этот прием применяют и для деталей со стенками толщиной более 3 мм. В данном случае гибку осуществляют за две операции. Первую операцию производят в штампе с радиусным прижимом-выталкивателем. Вторая операция заключается в правке средней полки. Радиус кривизны прижима-выталкивателя подбирают опытным путем.

Для получения точного наружного размера скоб применяют штампы с раздвижным пуансоном, а для получения точного внутреннего размера применяют штампы с раздвижной матрицей.

Помимо обычной гибки, П-образные детали могут быть получены с различной толщиной средней и боковых полок. В этом случае используют штампы с прижимом, но с отрицательным зазором между пуансоном и матрицей (зазор  $z$  равен толщине боковых полок, которая меньше толщины  $s$  исходной заготовки) (рис. 6.14, в).

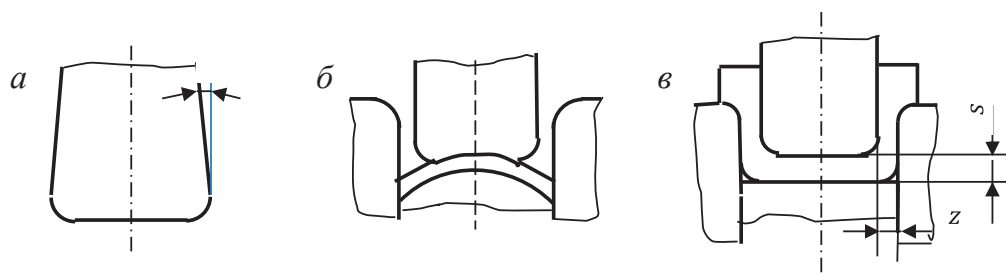


Рис. 6.14. Схемы рабочих частей штампов для гибки скоб:  
 а — пуансон с поднутрением; б — гибка с обратным выгибом дна;  
 в — гибка с отрицательным зазором

Процесс гибки деталей сложного профиля осуществляется обычно по трем схемам:

- вырезка заготовки и последующая ее гибка за несколько операций в простых штампах;
- вырезка заготовки и последующая гибка в сложном штампе;
- полное изготовление в одном многопереходном комбинированном штампе последовательного действия.

Первая схема изготовления обычно используется в условиях серийного производства. Вторая и третья схемы применяются для серийного и массового производства. Для изготовления деталей типа втулок,

колец, хомутов, в зависимости от размеров деталей, их точности, характера производства, применяется несколько вариантов технологических процессов.

Изготовление цилиндрических или конических втулок из материала толщиной более 0,5 мм из штучной заготовки осуществляется путем предварительной и окончательной гибки. Для повышения точности размеров, втулки подвергают калибровке. На первом переходе заготовка изгибается волнообразно. Концы заготовки подгибаются по радиусу  $R_1$ , а центральный участок изгибается в обратном направлении  $R_2$ . На втором переходе заготовке придают форму втулки или кольца. Окончательное устранение пружинения достигается калибровкой. Размеры волнистой формы подсчитываются по формулам

$$R_2 = \left( \frac{180}{\beta} - 1 \right) R_1; \quad a = \sin \frac{\beta}{2} (R_2 + R_1); \quad l = 2 \sin \frac{\beta}{2} (R_2 + R_1).$$

Втулки и кольца диаметром 80–150 мм, изготавливаемые из листа толщиной 5–10 мм и более, получают в три гибочные операции. В результате первой гибочной операции подгибают продольные кромки, в результате второй операции заготовке придают корытообразную форму (рис. 6.15). Из этой формы в результате третьей операции получается втулка (кольцо), поступающая на сварку.

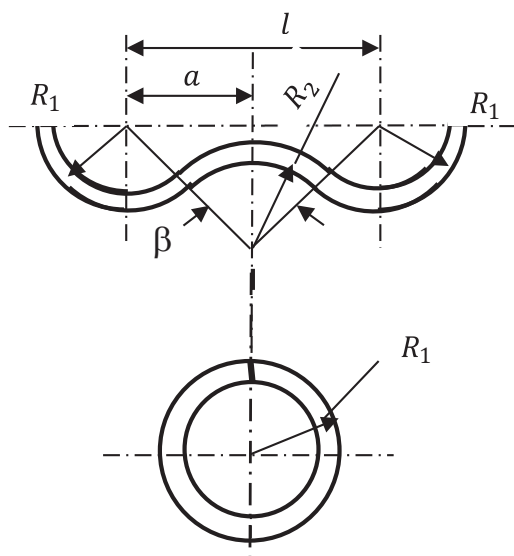


Рис. 6.15. Последовательность гибки втулок в две операции

При больших диаметрах и длинах, а главное — толщинах используют секционный метод гибки на универсальных штампах. С помощью секционного метода гнут заготовки значительной толщины (до 120 мм).

Когда диаметр, толщина и длина детали не велики, применяют кривошипные прессы, а когда эти размеры большие, используют гидравлические прессы. Кольца и втулки довольно больших диаметров гнут на гибочных трехвалковых и четырехвалковых вальцах, а не на прессах. Описание гибки на гибочных вальцах и необходимые технологические расчеты гибки приведены в специальной литературе и справочниках.

Гибкой без нагрева заготовок изготавливают из листового материала детали различных габаритных размеров толщиной 0,01–100 мм, имеющих в поперечном сечении разнообразные профили. Для успешного изготовления деталей методами гибки, они должны удовлетворять ряду требований.

Для обеспечения достаточной точности гибки П-образных деталей, высота  $H$  прямой части отгибаемых полок детали должна быть больше двойной толщины полки, т. е.  $H - r \geq 2s$  (при условии, что  $s < 5$  мм). Если это условие не выполнено, т. е. деталь имеет меньшую высоту полки, необходимо в заготовке, поступающей на гибку, предварительно выдавливать канавки шириной  $b \geq s$  и глубиной  $h = (0,1 \dots 0,3)s$  или изготавливать деталь с удлиненными полками  $H > 2s$  и фрезеровать их после гибки.

Радиусы закругления у скоб должны быть равными, в противном случае трудно получить деталь с одинаковой высотой полки.

Важным параметром является внутренний радиус гибки на детали. Необходимо, чтобы он был несколько больше минимально возможного радиуса гибки. Приведенные в справочниках минимальные радиусы гибки относятся к радиусам, оформляемым пуансоном. Если деталь имеет форму скобы с горизонтальными полками и изготавливается в одном штампе, то радиус, обращенный в сторону матрицы, должен быть больше  $3s$ . В противном случае на боковых полках детали возможны задиры и вмятины, что особенно опасно для плакированных металлов.

Весьма важным при конструировании деталей, получаемых гибкой, является придание формы с возможно малым числом перегибов, поскольку каждый перегиб удорожает деталь и является дополнитель-

ным источником погрешностей. При наличии нескольких линийгиба желательно, чтобы их длины резко не отличались между собой. При гибке детали с разной линиейгиба, деталь будет стягиваться в сторону участка с более длинной линиейсгиба.

Длина заготовки, необходимая для получения изогнутой детали с требуемыми размерами, определяется из равенства ее длины длине  $L_{\text{нпд}}$  нейтральной поверхности деформаций (поверхности, на которой отсутствуют деформации). Для определения размеров заготовки, таким образом, необходимо знать положение нейтрального слоя деформаций.

Для малых упругопластических деформаций, например при гибке с относительным радиусом  $\frac{r}{s} > 5$ , принимают, что нейтральный слой проходит по середине толщины заготовки и его положение определяется радиусом кривизны  $\rho_n = r + \frac{s}{2}$ .

Для значительных пластических деформаций — при гибке заготовок с  $\frac{r}{s} < 5$ , изгиб сопровождается уменьшением толщины материала — утонением и смещением нейтрального слоя в сторону сжатых волокон, а для узких полосы  $b < 3s$  — и изменением формы поперечного сечения.

Радиусы кривизны нейтральной поверхности деформаций можно определить, используя коэффициенты смещения  $x$  нейтральной поверхности, значение которых зависит от относительного радиуса изгиба  $r^* = \frac{r}{s}$ . Зная  $x$ , можно определить радиус кривизны нейтральной поверхности деформаций

$$\rho_n = r + \frac{s}{2}.$$

С уменьшением радиуса изгибаемой детали  $r$ , положение нейтральной поверхности деформаций смещается в сторону сжатых волокон. Она совпадает со срединной поверхностью при  $\frac{r}{s} > 5$ , т. к. при этом  $x = 0,5$ .

Утонение листовой заготовки в зоне пластической деформации при гибке можно приближенно определить, воспользовавшись соотношением



$$s - s_d = \Delta s = \frac{s^2}{4(2r + s)^2},$$

где  $s$  — толщина заготовки;  $s_d$  — толщина изогнутой детали;  $r$  — внутренний радиус изгибаемой заготовки.

Расчеты по этой формуле показывают, что утонение становится заметным при малых радиусах изгиба, например, при  $r = 2s$  значение  $\Delta s$  составляет около 1 % толщины заготовки.

Толщина листовой заготовки в зоне пластической деформации после гибки может быть определена на основании экспериментальных данных как произведение коэффициента уменьшения толщины (коэффициента утонения)  $\eta$  на начальную (до гибки) толщину заготовки  $s$

$$s_d = \eta s.$$

В табл. 6.6 приведены значения коэффициента смещения  $x_0$  нейтральной поверхности деформаций и коэффициента утонения  $\eta$ .

Таблица 6.6

**Коэффициенты  $\eta$  и  $x_0$  для гибки под углом  $90^\circ$  широких заготовок из сталей 10 и 20**

Величины	$r/s$											
	0,1	0,2	0,3	0,5	0,8	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	св. 5
$\eta$	0,82	0,87	0,89	0,92	0,94	0,96	0,975	0,985	0,992	0,995	0,998	1,0
$x_0$	0,30	0,34	0,36	0,38	0,405	0,42	0,44	0,455	0,47	0,475	0,48	0,5

Радиус нейтральной поверхности деформаций с учетом смещения нейтральной поверхности и уменьшения толщины детали при гибке можно определить по формуле

$$\rho_n = \left( \frac{r}{s} + \frac{\eta}{2} \right) \frac{\eta s b_{cp}}{b},$$

где  $\frac{b_{cp}}{b}$  — величина поперечной деформации заготовки;  $b_{cp}$  — средняя ширина изогнутой заготовки после гибки, мм;  $b$  — начальная ширина заготовки, мм.

Зная положение нейтральной поверхности деформаций, можно определить длину этой поверхности, а следовательно, и длину заготовки, необходимую для получения изогнутой детали с требуемыми размерами. Для определения длины заготовки пользуются способом

развертки детали, который основан на том положении, что нейтральная линия сохраняет при гибке свои первоначальные размеры и расположена в местах закруглений на расстоянии  $x_s$  от внутренней стороны изделия.

Для определения длины заготовки, контур детали разбивают на прямолинейные и криволинейные участки с постоянным радиусом кривизны. Длину заготовки определяют как сумму длин прямолинейных и криволинейных участков, а длину криволинейных участков подсчитывают по нейтральной поверхности

$$L_{\text{заг}} = L_{\text{нпд}} = \sum l_i + \sum \left( \frac{\pi \alpha_i}{180} \right) \rho_{\text{нл}},$$

где  $l_i$  — длина прямолинейных участков;  $\rho_{\text{нл}}$  — радиус нейтральной поверхности деформаций криволинейных участков.

Итак, для расчета длины заготовки (развертки), обеспечивающей после гибки получение заданных размеров детали, необходимо:

- определить положение нейтрального слоя (нейтральной линии) детали в зоне деформации, который сохраняет свою длину неизменной после гибки;
- разбить контур штампуемой детали на элементы, представляющие собой отрезки прямой и части окружностей;
- просуммировать длины этих отрезков. Длины прямых участков суммируются без изменения, а длины криволинейных участков — с учетом деформации материала и соответственного смещения нейтрального слоя.

При расчете возможно два случая: детали с радиусом изгиба  $r > 0,1s$  (гибка с закруглениями) и детали с радиусом изгиба  $r < 0,1s$  (гибка без закруглений).

Длину  $L_{\text{заг}}$  развертки для детали, подвергнутой гибке при  $r > 0,1s$ , рассчитывают по нейтральному слою (рис. 6.16)

$$L_{\text{заг}} = l_1 + l_2 + l_0(\alpha) = l_1 + l_2 + \frac{\pi \alpha}{180} (r + x_0 s),$$

где  $x_0$  — коэффициент смещения нейтральной поверхности, его значения зависят от относительного радиуса изгиба  $\frac{r}{s}$ . Коэффициент смещения нейтральной поверхности тем больше, чем больше относительный радиус гибки (см. табл. 6.6).

В тех случаях, когда гибку ведут до соприкосновения сторон (рис. 6.17) длину заготовки рассчитывают по формуле

$$L_{\text{заг}} = l_1 + l_2 - 0,43s.$$

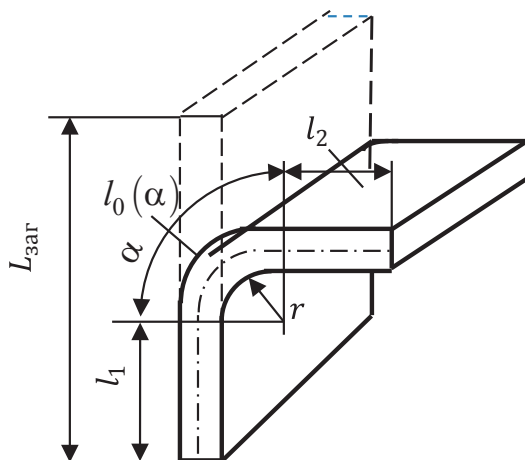


Рис. 6.16. Схема к расчету длины заготовки с одним перегибом при гибке на угол изгиба  $\alpha$

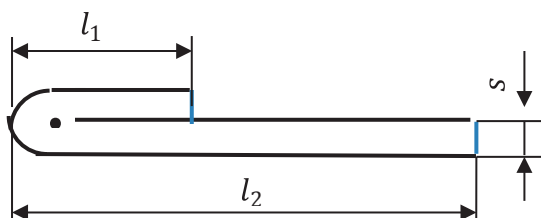


Рис. 6.17. Схема к расчету длины заготовки при гибке до соприкосновения сторон

В случае многоугловой гибки имеем

$$L_{\text{заг}} = l_1 + l_2 + \dots + l_n + l_{\alpha_1} + l_{\alpha_2} + \dots + l_{\alpha_m},$$

или

$$L_{\text{заг}} = \sum_1^n l_i + \sum_1^m \frac{\pi \alpha_j}{180} (r_j + x_j s) \approx \sum_1^m 0,017 \alpha_j (r_j + x_j s),$$

где  $n$  — число прямолинейных участков;  $m$  — число криволинейных участков.

Длину заготовки для гибки деталей без закругления, т. е. при  $r < 0,1s$ , рассчитывают по формуле, составленной на основе равенства объемов заготовки и детали с учетом утонения материала в месте изгиба

$$L_{\text{заг}} = l_1 + l_2 + \dots + l_n + ks(n-1),$$

где  $ks(n-1)$  — прибавка на образование углов;  $n$  — число прямых участков.

Величина  $k$  на образование каждого из углов влияет в зависимости от радиуса пуансона,  $k = 0,58 \dots 0,4$  при  $r = 0,05s$ , а  $k = 0,45 \dots 0,48$  при  $r = 0,1s$ .

Радиус нейтрального слоя при гибке деталей из проволоки диаметром 3 мм и более определяется по той же формуле, что и при гибке прямоугольных заготовок; при этом считают, что нейтральная линия проходит на расстоянии  $x = (5/12)d \approx 0,4166d$  от внутренней линиигиба ( $d$  — диаметр проволоки, мм). Таким образом, расчет развертки при гибке деталей из проволоки отличается от расчета деталей из листа положением нейтрального слоя.

При гибке деталей из проволоки с малыми радиусами, сечение в зоне гибки получается овальным.

Формулы и номограммы для расчета длины заготовки при гибке для получения часто встречающихся форм деталей приводятся в справочниках [3, 7].

При изготовлении сложных и ответственных деталей методами гибки рекомендуется определять длину их заготовки опытным путем, поскольку не всегда удастся точно определить ее теоретически из-за влияния таких факторов, как свойства материала, скорость деформации, конструкция штампов и других факторов.

Точность деталей, получаемых гибкой в инструментальных штампах, зависит от факторов, основными из которых являются:

- форма и размеры изготавливаемой детали;
- однородность механических свойств материала заготовок, поступающих на гибку;
- колебания по толщине заготовок (величины отклонений толщины заготовок от номинального размера);
- число переходов (операций) при гибке;
- тип гибочного штампа и точность его изготовления;
- точность базирования заготовки при гибке;
- точность установки штампа (его наладки перед гибкой);
- наличие операции калибровки после гибки.

Отклонения от точности выражаются в погрешностях формы и размерных погрешностях.

Погрешности формы зависят от механических свойств (упругости) материала и его толщины, направления волокон в заготовке, относительного радиуса изгиба  $r^* = \frac{r}{s}$ , величины зазора между пуансоном и матрицей и от силы удара пресса. Отклонения от заданной формы, как уже рассматривалось выше, связано с пружинением материала. Рассеивание угла пружинения при относительных радиусах изгиба  $r^* = \frac{r}{s} = 0,5 \dots 4,0$  указано ниже:

мягкие материалы .....	$\pm 15' \dots \pm 1^\circ$ ;
матералы средней твердости .....	$\pm 30' \dots \pm 2^\circ$ ;
твердые материалы .....	$\pm 1 \dots \pm 4^\circ$ .

При  $r^* = \frac{r}{s} > 4$  рассеивание угла пружинения составляет 8–10 % от угла пружинения  $\Delta\alpha$ . Для уменьшения угла пружинения применяют после гибки калибровочные операции или производят изменения в конструкции рабочих частей штампа.

Размерные погрешности выражаются в отклонении по длине детали и высоте ее полков, в отклонениях расстояния между отверстиями или расстояния от полки до оси отверстия. Эти погрешности зависят от типа штампа, точности его изготовления, точности укладывания заготовки в штамп, ее устойчивости в процессе гибки.

Для погрешностей, связанных с изготовлением рабочих частей штампа и их износом, достаточно задать необходимые допуски.

Допуски на изготовление рабочих размеров одноугловых штампов назначают обычно в угловом исчислении, исходя из величины рассеивания угла пружинения. Допуски на рабочие размеры двухугловых штампов для получения деталей типа скобы устанавливают в зависимости от того, какой размер изделия по техническим условиям требуется выдержать точно — наружный (А) или внутренний (В).

Допуски, необходимые для изготовления рабочих частей штампа, и допускаемые отклонения размеров деталей, получаемых гибкой, приводятся в справочниках и в литературе [3, 5, 10].

В ряде случаев, особенно при производстве автомобильных деталей, необходимо получить заданную шероховатость поверхности детали. Шероховатость поверхности при гибке зависит от шероховатости по-

верхности заготовки, поступающей на гибку, геометрии матрицы (радиусов схода), величины зазора между пуансоном и матрицей, колебаний толщины материала, характера смазки, применяемой при гибке, шероховатости поверхности рабочей полости штампа.

При гибке возможны следующие виды брака: искажение формы штампуемой детали вследствие пружинения, вмятины на поверхности детали, царапины и задиры, трещины по линии гибки, изменение толщины материала в зоне гибки, смещение изгибаемых участков относительно друг друга (перекос) и др. Приведенные виды брака относятся к листовым деталям.

Причина искажения формы детали вследствие пружинения заключается в неучете и неправильном определении величины пружинения при проектировании и изготовлении штампа, а также в разбросе свойств материала и размеров изгибаемых заготовок.

При назначении радиуса закругления матрицы по размерам детали, вследствие неточности изгибаемого материала по толщине, неточности изготовления штампа, загрязнения матрицы, возможен недогиб детали. Для устранения брака радиус на матрице необходимо сделать несколько меньше радиуса детали.

Причиной вмятин при гибке деталей из мягких материалов являются малые радиусы схода на матрице и износ штампа. Царапины и задиры являются следствием загрязнения смазки или налипания частиц штампуемого металла на стенки матрицы, а также некачественной смазки или ее отсутствия. Для исключения вмятин и отпечатков на поверхности изгибаемой детали необходимо на матрице иметь радиусы, составляющие  $r_m > 3s$ , где  $s$  — толщина изгибаемого материала. Лучшие результаты получаются, если рабочий профиль матрицы выполняется по трактрисе или по кривой близкой к дуге эллипса. Возможность налипания можно уменьшить тщательной полировкой рабочей полости штампа, правильным выбором зазора и смазки.

Наплывы на боковой полке П-образной детали, утонения на отдельных участках или искривление полок — это результат неправильного выбора зазора между пуансоном и матрицей и недостаточной глубины матрицы. При зазоре между пуансоном и матрицей меньше толщины детали наблюдаются наплывы на участке входа в матрицу и утонения участка детали в матрице. При зазоре между пуансоном и матрицей больше толщины детали вертикальные или наклонные полки детали не получают правильной формы.

При гибке П- и V-образных деталей часто получаются полки разной высоты вследствие неправильной установки фиксатора относительно матрицы, сдвига заготовки в процессе гибки из-за разных радиусов закругления рабочей части матрицы, разной степени отделки или износа радиусов матрицы. Сдвиг заготовки может происходить и при одинаковых радиусах, особенно если рабочая полость матрицы глубокая. Избежать сдвига заготовки, а значит, и большого рассеивания размеров можно, если в конструкции штампа предусмотреть керны или прижим заготовки.

Перекося детали обычно вызван неправильным расположением заготовки относительно пуансона и матрицы.

Причины утонения металла при гибке весьма разнообразны, основными из них являются малые радиусы сопряжений рабочих частей пуансона и защемление заготовки между матрицей и пуансоном при гибке фасонных деталей.

Трещины появляются в результате неправильного выбора радиуса закругления пуансона, пороков в материале заготовки, а также расположения линии гибки вдоль направления прокатки.

**Гибка профилей и труб и гибка растяжением — сжатием.** Применение гнутых профилей из листового и полосового проката позволяет существенно снизить массу изготавливаемых из них деталей и сборочных единиц машин. Сортамент гнутых профилей состоит из сортовых, листовых гофрированных профилей и профилей специального назначения, изготавливаемых из рулонных заготовок толщиной 0,5–8 мм и шириной 30–1500 мм из углеродистых и низколегированных сталей.

Гнутые профили могут быть изготовлены гибкой в универсальных штампах, устанавливаемых на листогибочных прессах, на листогибочных машинах с поворотным столом и на профилегибочных станах [5].

Область применения того или иного способа изготовления гнутых профилей зависит от формы, размеров, толщины исходного материала и масштаба производства.

Гибка профилированных заготовок и труб с относительно малой толщиной стенки, подобно гибке листового металла, всегда связана с проблемой пружинения, определяющей точность изделия. В отличие от гибки листа, смещение нейтральной оси и предел формоизменения, особенно для алюминиевых сплавов, более индивидуальны (здесь нейтральная ось определяется как недеформируемый слой).

Кроме этих и других сходных элементов, между гибкой листа и гибкой профилированных изделий имеются следующие схожие проблемы, которые возникают только при гибке этих изделий: большое разнообразие возможных поперечных сечений заготовок; неустойчивость стенок профиля (образование складок); большие локальные деформации, особенно на наружных слоях профиля; большие деформации поперечных сечений; недостаточная точность заготовок, т. е. свойств материала и толщины стенки; высокая жесткость заготовок; скручивание выдавленного профиля при гибке несимметричного профиля или симметричного профиля вдоль оси, не являющейся главной осью; трудности в быстрой разработке прототипа для функционирующих прототипов вследствие долгого процесса поиска установочных параметров (до 5 мес.); необходимость машин с большим количеством контролируемых осей (20 приводных осей не является необычным явлением для сравнительно простых профилей).

Гибка осложняется возможностью потери устойчивости (складкообразования) в зоне сжатия, возможностью изменения угла между полками гнутых уголков и П-образных профилей, а также, при больших радиусах кривизны изгиба, — большой упругой деформацией (пружинением). В связи с этим при гибке профилированных заготовок, сортового проката, гнутых профилей и труб применяют специальные приемы и оборудование.

Обычной гибкой в штампах нельзя получить узкие и длинные детали с большим радиусом, т. е. детали с малой кривизной. При гибке таких деталей, в поперечном сечении возникают в основном упругие деформации и после разгрузки заготовка распружинивает и распрямляется. Гибку подобных деталей производят гибкой с растяжением [9].

Сущность гибки растяжением заключается в том, что кроме внешнего изгибающего момента к заготовке прикладываются продольные растягивающие силы, которые уменьшают изгибающий момент (рис. 6.18). При этом по сравнению с простым изгибом в значительной мере уменьшается влияние упругого восстановления металла при разгрузке на кривизну изогнутого элемента. Точность размеров изогнутой детали, зависящая от ее упругих деформаций, повышается пропорционально уменьшению изгибающего момента.

Кроме того, создание по всему сечению изгибаемой заготовки однородных по знаку растягивающих напряжений исключает образование складок на вогнутой поверхности деталей.



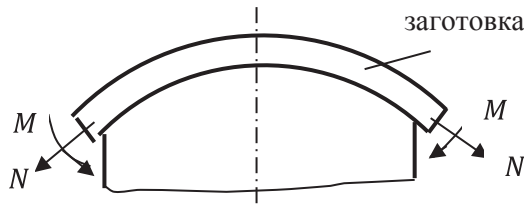


Рис. 6.18. Схема гибки с растяжением

Изгибающий момент при гибке с растяжением будет определяться в соответствии с разностью  $M = M_{\sigma_0} - M_N$  момента, образованного окружными напряжениями  $\sigma_0$ , и момента, образованного действием продольной силы  $N$ . Отсюда можно вывести формулу, которая функционально связывает изгибающий момент  $M$  и продольную растягивающую силу  $N$  на стадии линейного чисто пластического изгиба применительно к изгибу заготовки единичной ширины:

$$M = \sigma_s \left( \frac{s^2}{4} - \frac{N^2}{4\sigma_s^2} \right).$$

Анализ формулы показывает, что при увеличении продольной силы  $N$  изгибающий  $M$  момент уменьшается. С уменьшением  $M$  уменьшаются и упругие деформации, и при  $M = 0$  все слои заготовки будут только растянуты. В таком случае при разгрузке возникают только линейные деформации, угловые деформации практически отсутствуют, т. е. точность размеров изогнутой детали существенно возрастает.

При изгибе с растяжением, нейтральный слой проходит не в центре тяжести сечения, а значительно смещается к центру кривизны. Чем больше растягивающее усилие, тем на большее расстояние смещается нейтральный слой. При значительном осевом усилии, нейтральная линия может совпадать с внутренним краем изогнутой заготовки или может быть выведена за пределы сечения, тогда нормальные напряжения в сечении будут одного знака — растягивающие. В этом случае направления деформации на наружной и внутренней поверхностях заготовки после разгрузки будут, в отличие от обычной гибки без растяжения, одного знака. Пружинение детали после штамповки будет ничтожным, и ее размеры не искажаются. Кроме того, когда деформации растяжения вследствие приложенной растягивающей силы превышают упругие, изгиб заготовки происходит в области пластиче-

ских деформаций. В связи с этим деталь сохраняет форму, приданную ей штампом. Для того чтобы при гибке получить растяжением пластическую деформацию по всему сечению, необходимо растянуть заготовку на 4–5 % первоначальной ее длины.

При гибке с продольным растяжением, пружинение незначительно, однако оно полностью не исключается, т. к. деформация наружных и внутренних слоев заготовки различна. Поэтому будет различным и упрочнение этих слоев, оказывающее влияние на упругую деформацию.

В массовом и крупносерийном производстве гибка с продольным растяжением относительно небольших деталей может осуществляться в штампах. Такие штампы имеют два боковых ползуна, которые по мере опускания матрицы опускаются вниз, а опирающаяся на них заготовка не только изгибается, но и растягивается в продольном направлении контактными силами трения.

Однако в большинстве случаев гибку с продольным растяжением проводят на специализированных машинах, которые нашли широкое применение в массовом производстве деталей разнообразной конфигурации, получаемых из ленты и штучных заготовок. На этих машинах предварительно растянутую заготовку изгибают и обтягивают вокруг шаблона, который имеет форму и размеры детали. Возможна и другая последовательность работы машины — сначала гибка, а затем растяжение. Весь цикл машины обычно автоматизирован, машина настроена на гибку определенной детали и работает по заданной программе.

На универсально-гибочных автоматах можно изготавливать детали разнообразных форм и размеров из проволоки диаметром до 6 мм и ленты толщиной до 2 мм и шириной до 70 мм. На таких автоматах кроме изготовления деталей из ленты можно осуществлять соединение их кромок швом в замок или прошивкой. Для универсально-гибочных автоматов характерны высокая производительность, стойкость инструмента и качество, а также экономное использование металла и низкая стоимость изготавливаемых деталей.

Конструкции гибочных автоматов и расчеты, связанные с их наладкой, изложены в специальной литературе [1, 10, 12].

Наряду со специальными гибочными автоматами, на производстве создаются различные механизированные приспособления для гибки, которые с успехом заменяют громоздкие прессы и сложные штампы при изготовлении деталей сложной конфигурации.

Наряду с гибкой растяжением, применяют и гибку с продольным сжатием заготовки в штампе. Действие сжимающих продольных сил при гибке заготовок со сжатием аналогично действию продольных растягивающих сил при гибке с растяжением. Сжимающие продольные силы уменьшают момент, необходимый для пластического изгиба заготовки, в связи с чем повышается точность размеров изогнутой детали. При гибке с продольным сжатием нейтральная поверхность напряжений смещается в сторону выпуклой поверхности заготовки и при сжимающих напряжениях равных  $\sigma_s$  совпадает с ней.

Кроме повышения точности размеров изгибаемых деталей, гибка со сжатием позволяет получать двухугловые детали с малым радиусом изгиба. Если напряжения сжатия достигают значений  $\sigma_s$ , то можно получить радиусы изгиба меньше толщины заготовки.

## 6.4. Вытяжка

Вытяжка — технологический процесс листовой штамповки, при котором из плоской или полый листовой заготовки получают полые пространственные изделия (детали), как правило, не требующие дальнейшей обработки. Номенклатура деталей, изготавливаемых вытяжкой, очень многочисленна. Вытяжкой получают детали: осесимметричные (цилиндрические, конические, с криволинейной образующей и т.п.), например, днища различных резервуаров, котлов и баков, детали осветительной аппаратуры, гильзы снарядов и патронов, металлическую посуду и др.; детали, имеющие коробчатую форму с плоскими боковыми стенками или сложной конфигурации, — топливные баки, тару для продуктов и различных материалов, бидоны и пр.; несимметричные детали — кузовные детали автомобиля, корпусные детали различных видов транспорта, детали химической аппаратуры, детали теплообменных аппаратов и др.

Исходя из формы и технологических особенностей листовой штамповки, полые детали, получаемые вытяжкой, можно разделить на несколько основных групп:

- детали, имеющие форму тела вращения;
- детали коробчатой формы;
- детали сложной формы.

Детали, имеющие форму тела вращения, могут быть с фланцем или без фланца, с плоским или фасонным дном. Детали коробчатой формы могут иметь квадратные, прямоугольные, криволинейные боковые стенки с фланцем или без фланца; дно у них может быть плоское или фасонное. Детали сложной формы могут быть полусимметричные, имеющие только одну плоскость симметрии (корпус и крыша кабины автомобиля), и несимметричные (крыло автомобиля). В зависимости от формы детали, заготовка подвергается либо вытяжке в чистом виде, либо вытяжке в сочетании с формовкой, гибкой и обжимом или с отбортовкой.

Вытяжкой можно изготовить детали из материалов толщиной от 0,01–0,03 до 30 мм с размерами от нескольких миллиметров до нескольких метров и весом до двух тонн.

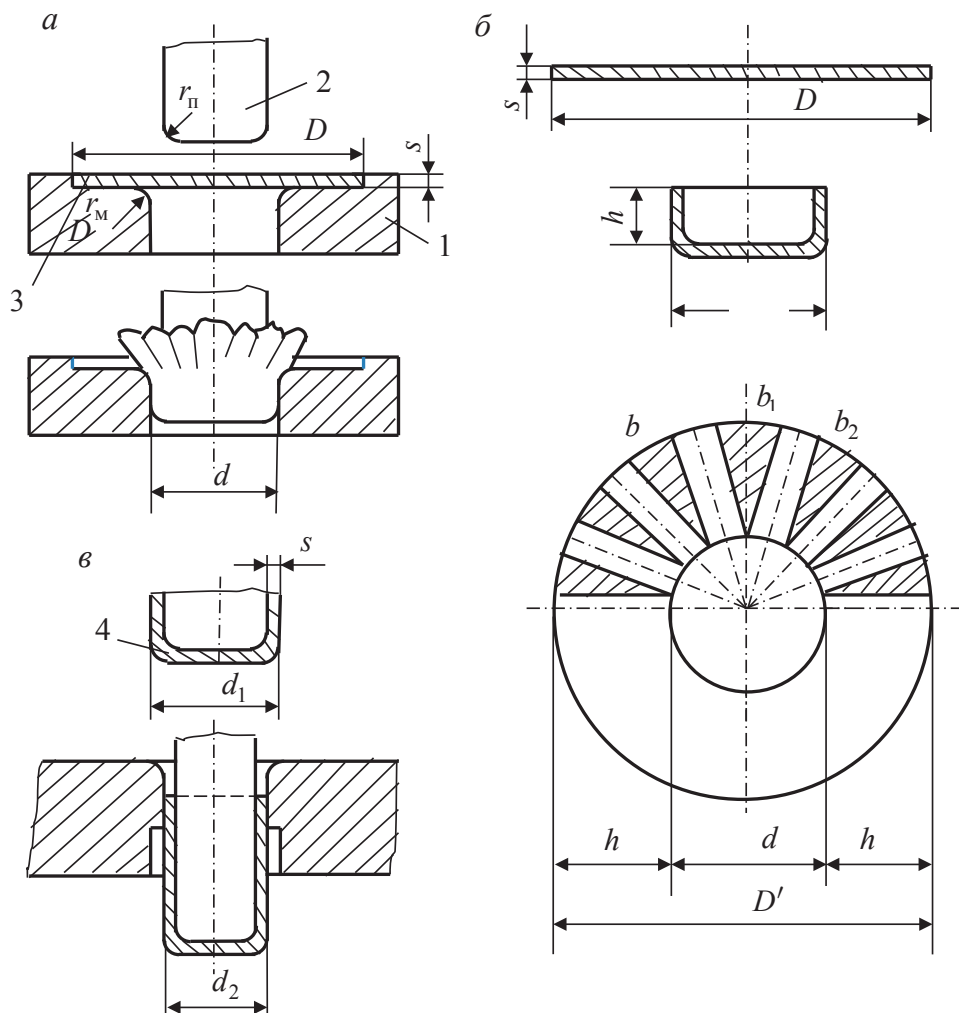
Вытяжка производится на эксцентриковых, кривошипных и гидравлических прессах в специальных штампах, рабочими органами которых являются матрица со скругленной рабочей кромкой, пуансон и, если это необходимо, прижим. Между пуансоном и матрицей имеется зазор  $z$ , в который пуансон втягивает заготовку. Листовая заготовка протягивается пуансоном через отверстие матрицы, в результате чего периметр заготовки уменьшается и плоская заготовка превращается в полое изделие или полуфабрикат (первый переход вытяжки) или же полый полуфабрикат получает дальнейшее уменьшение поперечных размеров при одновременном увеличении его высотных размеров. Детали в зависимости от их конструктивных особенностей и свойств материала штампуют в одну или несколько операций или переходов.

Изготовление деталей вытяжкой осуществляется в основном без нагрева заготовки, в холодном состоянии. Однако заготовку из толстолистовой стали (толщиной больше 20 мм) перед вытяжкой нагревают для снижения деформирующего усилия. Нагреву подвергают и заготовки ряда сплавов, например таких, как титановые, в целях повышения их пластичности.

Сложность и длительность технологического процесса получения деталей вытяжкой зависит от величины допустимого формоизменения за переход, и этот технологический параметр является основным при проектировании технологического процесса. Для оценки степени влияния отдельных факторов на величину допустимого формоизменения, на энергосиловые параметры процесса вытяжки, а также на возможность появления дефектов в штампуемой детали, необходимо иметь представление о механизме деформирования заготовки

в процессе вытяжки. Наиболее простым процессом вытяжки является вытяжка цилиндрического стакана из плоской круглой заготовки.

Вытяжку без прижима заготовки (рис. 6.19) осуществляют в штампе без складкодержателя на прессе простого действия. Будем называть ту часть заготовки, которая остается на матрице по мере вытягивания заготовки в полость матрицы, фланцем. Площадь его при вытяжке непрерывно уменьшается.



По характеру и степени деформации различают: 1) вытяжку без утонения стенок; 2) вытяжку с утонением стенок (протяжку) и 3) комбинированную вытяжку.

В первом случае вытяжка происходит без заранее обусловленного изменения толщины материала стенки изделия, но при значительном уменьшении диаметра заготовки; во втором — вытяжка осуществляется за счет заранее предусмотренного уменьшения толщины стенки вытягиваемого полуфабриката при незначительном уменьшении его диаметра. Комбинированная вытяжка (третий случай) характеризуется одновременным значительным уменьшением диаметра и толщины стенки вытягиваемого полуфабриката.

В зависимости от относительной толщины заготовки или полуфабриката, вытяжку производят с применением или без применения прижима. Поскольку при вытяжке происходит втягивание материала заготовки 3 большего диаметра  $D$  пуансоном 2, с закруглением  $r_n$ , в матрицу 1 с закруглением  $r_m$ , имеющую меньший диаметр  $d$  (см. рис. 6.19, а), то естественно, что по краю вытянутого колпака образуются складки (гофры) из-за наличия избыточного материала, или так называемых характеристичных треугольников  $b$ :  $b_1, b_2, \dots, b_n$  (рис. 6.19, б). Однако для образования полого колпака диаметром  $d$  и высотой  $h$  достаточно было бы иметь заготовку диаметром  $D'$  без заштрихованных участков. Наличие избыточных треугольников приводит к необходимости вытеснения и перемещения металла при вытяжке вверх. На рис. 6.19, в, показана вытяжка на второй операции из полой заготовки 4. Образование складок вызывается напряженно-деформированным состоянием металла, приводящим при определенных геометрических соотношениях к потере устойчивости заготовки и образованию трещин (см. рис. 6.20, а).

Для предотвращения образования складок применяют прижимное кольцо, или складкодержатель 3, который прижимает фланец заготовки к матрице 1 таким образом, что материал не имеет возможности образовать складки, а вынужден перемещаться под давлением пуансона 2 в радиальном направлении. Прижим материала применяется как для первой операции вытяжки, т. е. при вытяжке детали из плоской заготовки (рис. 6.20, а), так и при последующих операциях вытяжки из полой заготовки (рис. 6.20, б).

Вытяжка без прижима применяется при изготовлении неглубоких сосудов или изделий из толстых материалов, когда складки поч-

ти не образуются или выглаживаются при прохождении через вытяжную матрицу.

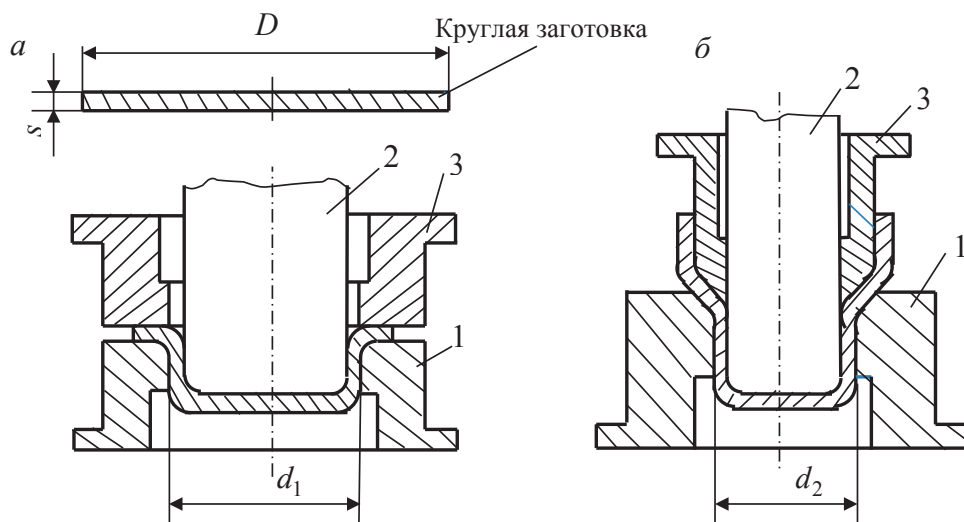


Рис. 6.20. Вытяжка с прижимом материала:

$a$  — первая операция вытяжки;  $b$  — вторая операция вытяжки: 1 — матрица; 2 — пуансон; 3 — прижим

#### 6.4.1. Напряженно-деформированное состояние металла при вытяжке

При вытяжке плоская заготовка диаметром  $D$  (рис. 6.21), перемещающаяся во время вытяжки, изменяет свои размеры и занимает ряд промежуточных положений. При этом материал деформированной заготовки в различных ее частях находится в разных условиях. В случае вытяжки с прижимом без утонения материала и с зазором большим толщины заготовки (для случая осесимметричного деформирования в полярной системе координат), можно принять следующую схему напряженно-деформированного состояния (рис. 6.21) [3]. Дно частично образованного полого цилиндра — колпака (элемент  $a$ ) находится в плосконапряженном и объемно-деформированном состоянии. Поскольку деформация металла — двустороннее равномерное растяжение в плоскости дна и осевое сжатие — составляет на первой операции всего 1–3 %, ей можно пренебречь. При многооперационном процессе вытяжки уже после второй-третьей операции толщина дна заметно уменьшается, т. к. металл со дна постепенно поступает в зону макси-

мального утонения (у донного закругления), интенсивность утонения дна особенно проявляется у латуни, имеющей небольшую сосредоточенную деформацию сужения (по сравнению со сталью).

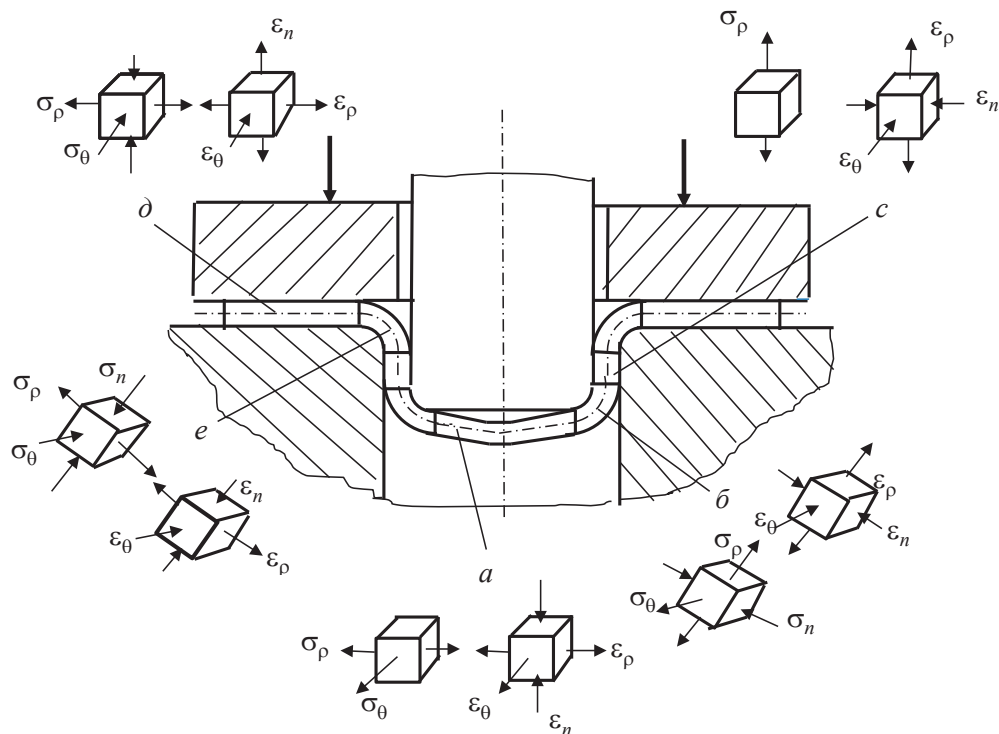


Рис. 6.21. Схема напряженно-деформированного состояния отдельных участков заготовки при вытяжке ( $\sigma$  — напряжения,  $\epsilon$  — деформации)

Цилиндрическую часть полого тела, находящуюся в зазоре между матрицей и пуансоном (элемент  $c$ ), можно считать находящейся в линейно-напряженном и объемно-деформированном состоянии. Непосредственно у донного закругления изделия (элемент  $б$ ) в металле возникают напряжения в виде двухосного растяжения и одноосного сжатия, приводящие к значительному растяжению и утонению стенок в этом месте. Вследствие этого поперечное сечение тела здесь является наименее прочным и наиболее опасным с точки зрения отрыва дна от стенок изделия. Это опасное сечение и ограничивает возможность максимального использования пластических свойств штампуемого металла.

Часть, находящаяся на закруглении рабочих кромок матрицы (элемент  $e$ ), испытывает сложную деформацию, вызванную одновремен-



ным изгибом и распрямлением заготовки, наибольшим радиальным (меридиональным) растяжением  $\sigma_r$  и незначительным тангенциальным (окружным) сжатием  $\sigma_\theta$ .

Часть заготовки, находящаяся под прижимным кольцом (элемент  $d$ ), находится в объемно-напряженном и объемно-деформированном состоянии. Однако при достаточно сильном прижиге можно считать  $\varepsilon_n(\varepsilon_z) = 0$ . В плоскостях фланца заготовки возникают радиальные (меридиональные) растягивающие  $\sigma_r$  и тангенциальные (окружные) сжимающие  $\sigma_\theta$  напряжения, а в перпендикулярном к ней направлении — осевые сжимающие напряжения  $\sigma_n$  ( $\sigma_z$ ), причем, ввиду небольшого значения  $\sigma_n$ , на практике им часто пренебрегают (при образовании явного клинового сечения во фланце  $\sigma_n = 0$ ). Мериональные растягивающие напряжения  $\sigma_r$ , вызываемые давлением пуансона у края заготовки, равны нулю; по мере удаления от края заготовки к центру матрицы, они возрастают, достигая наибольшей величины на входной кромке матрицы. Тангенциальные сжимающие напряжения  $\sigma_\theta$ , наоборот, у наружного края имеют наибольшую величину, а по мере удаления от края заготовки, значения их уменьшаются. В тот момент, когда край заготовки переместится на величину, составляющую 39 % от радиуса заготовки ( $0,39R$ ),  $\sigma_\theta$  становится равным  $\sigma_r$ . Под действием напряжений тангенциального сжатия, фланец заготовки утолщается (образуя иногда как бы клиновое сечение) и упрочняется; при недостаточном прижиге и тонком материале  $\left[ \frac{s}{D} 100 > 2 \right]$  это приводит

вследствие потери устойчивости к образованию складок.

В начальной стадии деформирования пуансон, оказывая давление на центральную часть заготовки, вызывает ее упругий прогиб. Усилия, действующие со стороны пуансона и матрицы, смещены в радиальном направлении и образуют изгибающий момент, который стремится приподнять фланец над верхним торцом матрицы. Дальнейшее опускание пуансона приводит к возникновению меридиональных растягивающих напряжений  $\sigma_r$ , которые стремятся втянуть фланец заготовки в отверстие матрицы. Перемещение материала фланца к отверстию матрицы сопровождается уменьшением радиуса заготовки и приводит к появлению во фланце тангенциальных сжимающих напряжений  $\sigma_\theta$ . Совокупное действие напряжений  $\sigma_r$  и  $\sigma_\theta$  переводит материал фланца согласно уравнению пластичности  $\sigma_r - \sigma_\theta = \sigma_s$  в пластическое состояние.

Очаг пластической деформации находится во фланце. Напряженное состояние фланца можно считать плоским двухосным разноименным. Процесс вытягивания из прижима начинается не с пластической деформации фланца заготовки, а с предшествующей ей начальной стадии процесса, который заключается в местной пластической деформации кольцевой, незажатой части заготовки.

В результате деформации тангенциального сжатия при вытягивании тонкого материала легко возникает потеря устойчивости фланца, из-за чего на нем образуются гофры. В толстом материале, при тех же размерах заготовки и изделия, возникновение гофров затруднено благодаря большей устойчивости фланца заготовки.

Условие вытяжки без складок для первого перехода в матрице с плоским рабочим торцом, предложенное Л. А. Шофманом, записывается в следующем виде [5]

$$D - d \leq (18...22)s, \quad (6.26)$$

где  $D$  — диаметр заготовки;  $d$  — диаметр вытягиваемого стакана;  $s$  — толщина материала.

Если неравенство (6.26) не удовлетворяется, то вытяжку целесообразно вести с прижимом. Интенсивно упрочняющиеся материалы менее склонны к складкообразованию, и предельное отношение  $\frac{s}{D}$  для них допустимо брать меньше, чем для менее интенсивно упрочняющихся материалов.

Толщина материала плоской заготовки и вытянутой детали различна. Из-за разноименной схемы напряженно-деформированного состояния, толщина стенок вытянутых изделий будет различна по всему продольному их сечению.

По мере приближения к верхней кромке, толщина материала непрерывно увеличивается, достигая максимальной величины на краях сосуда. В донной части она остается такой же, как в исходной заготовке, в местах перехода к стенкам имеет место утонение. Наибольшее утонение (10–18 %) происходит в месте перехода вертикальной стенки в дно колпака. В некоторых случаях (при отрыве дна) это утонение достигает 30 % и более. Со стороны открытого конца детали — утолщение примерно на 15–20 % от исходной толщины материала, достигающей иногда до 30 %.

Максимальное значение толщины края заготовки  $s_{\max}$  будет

$$s_{\max} = s_0 \sqrt{\frac{R}{r}} = s_0 \sqrt{\frac{D}{d}}. \quad (6.27)$$

Формула (6.27) может быть использована для приближенного расчета зазора  $z$  между пуансоном и матрицей штампа для вытяжки. Приняв  $z = s_{\max}$ , более точное значение величины зазора  $z$  определяют по таблицам, приведенным в справочниках [3, 7, 13].

Степень деформации материала, образующего стенку, возрастает по мере удаления от дна к кромке детали. Наибольшее утонение имеет опасное сечение, представляющее незначительно наклепанный участок заготовки и находящийся выше места сопряжения стенок и дна. В ряде случаев утонение достигает 30 %, обычно оно не превышает 10–25 %. Толщина материала в месте перехода от дна к стенкам уменьшается с увеличением степени деформации, относительной толщины заготовки  $\frac{s}{D}$ , пластичности металла, количества операций вытягивания и с уменьшением радиусов закругления пуансона и матрицы.

Основными факторами, определяющими величину утонения, являются:

- радиус закругления рабочей части вытяжной матрицы — чем меньше радиус закругления, тем больше утонение при всех прочих равных условиях;
- степень деформации — чем больше степень деформации, тем больше утонение;
- зазор между пуансоном и матрицей — с уменьшением зазора утонение увеличивается;
- усилие прижима заготовки — чрезмерная величина усилия прижима увеличивает утонение и может привести к отрыву дна детали.

Самым опасным местом детали является зона перехода от дна к стенкам вследствие возникновения здесь в начальной стадии вытягивания значительного утонения материала и больших растягивающих напряжений.

При большой степени деформации или при образовании складок на заготовке, растягивающие напряжения в опасном сечении нарушают его прочность и приводят к отрыву дна. Условие прочности опасного сечения определяет возможную степень деформации и выражается зависимостью

$$\sigma_{\max} < \sigma_p; \quad \sigma_p = \sigma_B (1 + \delta).$$

Действие прижима на фланец заготовки исключает образование складок и не допускает подъема фланца вследствие действия изгибающих моментов на входе в отверстие матрицы. Перемещение фланца в процессе вытяжки происходит под действием на него усилия прижима  $Q$ , что приводит к появлению сил трения, которые действуют на поверхностях контакта фланца с торцом матрицы и нижней плоскостью прижима. Силы трения, действующие на фланец, а также силы трения, действующие на заготовку при ее скольжении по радиусу кромки матрицы, увеличивают значение максимального растягивающего напряжения  $\sigma_p$ , возникающего на границе между фланцем и образующейся стенкой стакана. Кроме того, при входе элементов заготовки на скругленную кромку матрицы происходит изгиб элементов и их спрямление при сходе со скругленной кромки, на элементы заготовки действуют изгибающие моменты. Эти моменты также увеличивают значение максимального растягивающего напряжения, возникающего в опасном сечении. На величину этого напряжения оказывает влияние упрочнение металла заготовки в процессе деформирования.

Кольцевой фланец, ограниченный двумя окружностями, радиусы которых  $R_n$  и  $r$  (радиус детали), испытывает плоское напряженное состояние. Цилиндрический участок стенки стакана в результате давления пуансона, передаваемого на донную часть заготовки, находится в условиях близких к линейному растяжению. Донный участок испытывает двухосное растяжение. Кольцевой фланец вытягиваемой детали называют зоной пластической деформации, а цилиндрический и донный — зонами передачи усилий.

При учете всех перечисленных факторов с использованием степенной аппроксимации кривой упрочнения, распределение наибольшего радиального растягивающего напряжения по очагу деформации в произвольно фиксированный момент вытяжки для изотропного металла описывается соотношением

$$\sigma_{p \max} = \sigma_b \left[ \frac{1}{1 - \psi_p} \left( \frac{x}{\psi_p} \right)^{\frac{\psi_p}{1 - \psi_p}} \left( \ln \frac{R}{x} - x \right) + \frac{\mu Q}{\pi R s \sigma_b} + \frac{s}{2r_m + s} \right] (1 + 1,6\mu) \quad (6.28)$$

где  $\psi_p$  — относительное сужение образца материала заготовки при растяжении в области равномерной деформации;  $x$  — относительное сме-

щение края фланца заготовки в процессе вытяжки,  $x = \frac{R - R_n}{R}$ . Здесь

$R$  — радиус заготовки;  $R_n$  — наружный радиус фланца.

Первое слагаемое в приведенной формуле — напряжение, вызванное сопротивлением деформированию фланца заготовки с учетом упрочнения металла; второе — напряжение, возникающее при преодолении контактных сил трения, приложенных к плоской части матрицы и прижимного кольца; третье — напряжение, возникающее от изгиба и спрямления заготовки при ее втягивании в матрицу. Множитель  $(1 + 1,6\mu)$  учитывает влияние дополнительных растягивающих напряжений, возникающих при преодолении контактных сил трения на рабочей кромке матрицы.

**Вытяжка полуфабрикатов в последующих переходах.** Последующие переходы вытяжки выполняются в матрицах с конической заходной частью. В качестве заготовки служит стакан, полученный на первом переходе. Процесс ведется без прижима заготовки, если относительная толщина  $\frac{s}{D}100 \geq (5...7)(1-m)$ , и с прижимом заготовки, если  $\frac{s}{D}100 < (5...7)(1-m)$ , где  $m$  — коэффициент вытяжки,  $m = \frac{d}{D}$ .

Условия деформирования на последующих переходах вытяжки менее благоприятны, чем на первом переходе в связи с тем, что заготовка (стакан), вследствие упрочнения металла на первом переходе, имеет переменное, возрастающее по мере удаления от донного участка, напряжение текучести и переменную по высоте толщину стенки.

Существует оптимальный угол наклона образующей конической матрицы для вытяжки, при котором значение  $\sigma_{p\max}$  является наименьшим. Соотношение для определения оптимального угла имеет вид

$$\sin \varphi_{\text{опт}} = \sqrt{\mu \left(1 - \frac{r}{R}\right)} \sqrt{\frac{2R}{s}}.$$

В зависимости от условий деформирования оптимальные углы матрицы изменяются в пределах  $10-35^\circ$ .

На установившейся стадии второго перехода вытяжки в конической матрице происходит изменение кривизны срединной поверхности образующей заготовки. При этом в цилиндрической части заготовки,

еще не втянутой в матрицу, возникают окружные растягивающие напряжения  $\sigma_\theta$ . Они способны при определенных условиях вызвать появление продольных трещин вдоль образующей заготовки. Этому же способствует и деформационное упрочнение заготовки после первого перехода вытяжки.

Для устранения возможности появления такого дефекта были предложены матрицы для вытяжки с так называемой «реактивной полостью» — матрицы, у которых заходная часть сделана цилиндрической, в виде кольца высотой  $H = 0,4D$ , с размерами, обеспечивающими некоторый натяг при размещении в этой части вытягиваемой заготовки. Заходная цилиндрическая часть сопрягается с рабочей конической частью матрицы. Давление на наружную поверхность заготовки со стороны реактивной полости препятствует появлению и развитию окружных растягивающих деформаций и, следовательно, появлению продольных трещин при вытяжке. Использование матриц с реактивной полостью позволяет вести многопереходную вытяжку без межоперационных отжигов.

Последующие переходы вытяжки могут выполняться как в конических, так и в радиальных (цилиндрических) матрицах со скругленной заходной частью, например, при вытяжке деталей с широким фланцем или при вытяжке в ленте.

**Влияние упрочнения вытягиваемого металла при вытяжке.** В процессе холодной деформации металл упрочняется. Если стакан, полученный в первом переходе вытяжки из плоской заготовки, подвергнуть вытяжке во втором переходе, то в очаг деформации будет последовательно поступать все более упрочненный металл, для деформирования которого необходимы большие напряжения в опасном сечении, а следовательно, и усилия вытяжки по мере протягивания заготовки через матрицу. Для снятия упрочнения проводят рекристаллизационный отжиг [9].

Как видно на рис. 6.22, отжиг значительно уменьшает усилие вытяжки. В то же время наблюдается увеличение усилия вытяжки по пути движения пуансона, и в момент окончания вытяжки усилие достигает максимума. Это объясняется не только упрочнением металла в процессе вытяжки, но также и тем, что толщина стенки в протягиваемой заготовке переменна и увеличивается от дна стакана к краевой части. В связи с этим в процессе вытяжки в очаг деформации поступают элементы заготовки все с большей толщиной, для деформирования которых требуется все возрастающее усилие.

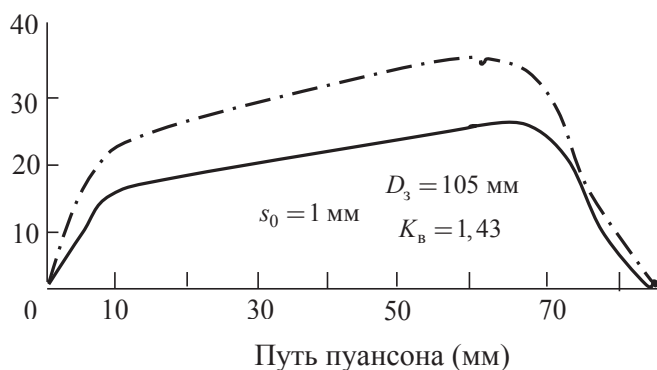


Рис. 6.22. Изменение усилия вытяжки по пути движения пуансона:  
 · — · — без отжига; — — — отжиг при 700 °C и нормализация при 900 °C

Увеличение усилия деформирования к концу вытяжки приводит к тому, что на последующих переходах вытяжки разрушение заготовки происходит не в начальном, а в конечном периоде деформирования. Разрушение происходит, как правило, вблизи перехода скругленной по кромке пуансона части заготовки к стенкам вытягиваемого стакана.

Таким образом, промежуточные отжиги дают возможность несколько увеличить степень деформации на последующих переходах вытяжки. При изготовлении деталей с большим отношением высоты к диаметру, отжиг между операциями вытяжки позволяет уменьшить число переходов вытяжки, а следовательно, штампов и оборудования, необходимых для данного технологического процесса. Однако для межоперационного отжига требуются нагревательные устройства, которые обычно размещаются в специальном отделении цеха. После отжига зачастую требуется травление для снятия окисной пленки и промывка для удаления остатков травящего раствора. Все это усложняет технологический процесс, увеличивает число транспортных операций, ухудшает условия механизации и автоматизации технологического процесса. Отсюда может оказаться, что многопереходная вытяжка без межоперационных отжигов, несмотря на увеличение числа переходов, будет экономически выгоднее, чем многопереходная вытяжка с промежуточными отжигами. Исследования показывают, что многопереходной вытяжкой без промежуточных отжигов можно получить детали с отношением высоты к диаметру свыше пяти (суммарная степень вытяж-



ки достигала величины примерно  $K_b = \frac{D}{d} = 5$  при числе переходов, достигающих десяти).

Заключительный отжиг после многопереходной вытяжки без промежуточных отжигов является необходимым, т. к. значительное суммарное упрочнение, а также возникающие при вытяжке остаточные напряжения сильно охрупчивают полученную деталь, так что даже небольшой внешний удар может привести к появлению продольных трещин.

#### 6.4.2. Технологические расчеты

**Размеры и форма заготовки.** Диаметр заготовки  $D$  находят, полагая, что ее толщина и площадь поверхности при вытяжке не меняются, т. е. из условия постоянства объема. Если толщина заготовки в процессе вытяжки не меняется, то диаметр заготовки можно определить из условия  $F_{\text{дет}} = F_{\text{заг}}$ , где  $F_{\text{дет}}$  и  $F_{\text{заг}}$  — площади детали и заготовки соответственно [5, 6, 7].

Для деталей, имеющих форму тел вращения, заготовка, как правило, имеет форму круга, поэтому

$$F_{\text{дет}} = 0,785 D^2,$$

откуда диаметр заготовки

$$D = 1,13 \sqrt{F_{\text{дет}}}.$$

Площадь поверхности детали  $F_{\text{дет}}$  вычисляется путем суммирования площадей поверхностей геометрически простых элементов, из которых состоит деталь. Диаметр заготовки можно определить, применяя следующую зависимость

$$D = 1,13 \sqrt{f_1 + f_2 + \dots + f_n} = 1,13 \sqrt{\sum f_i},$$

где  $f_i$  — площадь поверхности геометрически простого элемента детали.

При определении диаметра заготовок для деталей, получаемых вытяжкой и имеющих стенку толщиной менее 2 мм, расчет ведется по наружным (внешним) размерам детали, а для деталей со стенкой свыше 2 мм — по срединным размерам.

В справочной литературе приводятся формулы определения заготовок в зависимости от диаметра и высоты разнообразных цилиндриче-



ских деталей, основанные на равенстве площадей заготовки и детали. В ряде формул не учитываются радиусы закругления детали. Например, диаметр заготовки цилиндрической детали диаметром  $d$  и высотой  $h$  будет

$$D = \sqrt{d + 4dh}.$$

Диапазон применения этих формул ограничен радиусами  $r = (3...5)s_0$ . При больших радиусах закруглений ( $r > 5s_0$ ) рекомендуется формула

$$D = \sqrt{d_1^2 + 4d(h + \Delta H) + 2r_n(\pi d_1 + 4r_n)},$$

где  $\Delta H$  — припуск на обрезку неровного края детали;  $r_n$  — внутренний радиус у кромки дна детали.

Для расчета диаметра заготовок наиболее часто встречающихся деталей вращения, получаемых вытяжкой, имеются формулы, приведенные в справочниках по холодной штамповке [3, 7]. Эти формулы расчета диаметра заготовки дают удовлетворительные результаты на практике.

При расчете диаметра заготовки для вытяжки осесимметричной детали необходимо учитывать припуск на обрезку волнистой кромки полуфабриката, которая образуется из-за плоскостной анизотропии механических свойств материала заготовки. Выпуклые участки кромки называются фестонами, их высота достигает 20 % высоты детали. Фестоны располагаются на участках кромки детали симметрично относительно направления прокатки. Расположение фестонов зависит от свойств материала заготовки, режимов прокатки и термической обработки листа.

После вытяжки фестоны удаляются обрезкой. Значение припуска на обрезку  $\Delta H$  зависит от соотношения диаметра и высоты вытягиваемой детали и толщины заготовки. Экспериментально установлено, что  $\Delta H$  составляет 5–20 % высоты детали, чем больше относительная высота и толще металл, тем больше припуск на обрезку. Обрезку фестонов обычно проводят ступенчатым пуансоном, состоящим из рабочего участка и ловителя, диаметр которого на 0,2–0,3 мм меньше внутреннего диаметра детали. Если деталь вытягивается за одну операцию, обрезку фестонов можно совместить с вытяжкой в одном штампе.

Один из способов уменьшения неравномерности высоты вытянутой детали — использование фигурных (профильных) заготовок, форма

и размеры которых определяются с учетом анизотропии металла. Другими способами являются применение матриц с переменной (по контуру проема) кривизной рабочей кромки, неодинаковый нагрев фланца, дифференцированный по контуру матрицы прижим фланца и пр.

Диаметр заготовки для осесимметричных деталей со сложной криволинейной образующей определяется либо графоаналитическим методом, либо чисто графическим с использованием правила веревочного многоугольника [5, 7, 9].

В первом случае для расчета используют теоремы Гульдена — Паппа, согласно которым поверхность тела вращения  $F$ , описываемого плоской кривой  $L$  при вращении ее около оси, лежащей в плоскости этой кривой и не пересекающей ее, равна произведению длины кривой  $L$  на длину окружности, описываемой при этом вращении центром тяжести кривой, т. е.

$$F = 2\pi LX,$$

где  $L$  — длина образующей вытягиваемой детали, мм;  $X$  — расстояние от оси детали до центра тяжести образующей, мм.

Диаметр заготовки находят по формуле

$$D = \sqrt{8LX}. \quad (6.29)$$

Диаметр заготовки на основе приведенного правила рассчитывают следующим образом (рис. 6.23).

Расчетную линию контура (образующую) вытягиваемой детали с учетом припуска на обрезку, вычерченную в зависимости от размеров детали в определенном масштабе, разбивают на отдельные участки  $l_1, l_2, l_3$  и т. д., чтобы они представляли собой отрезки прямых линий или части окружности (рис. 6.23), а затем определяют их длины. На участки наносят положение центра тяжести. Для отрезков прямой центр тяжести находится посередине; для отрезков, являющихся частью окружности, положение центра тяжести приведено в справочниках [3, 7]. Далее умножают длину каждого участка на расстояние его центра тяжести от оси вращения (радиус центра тяжести дуги). Произведения  $l_i x_i$  для каждого участка заносят в расчетную таблицу и подсчитывают сумму

$$\sum LX = l_1 x_1 + \dots + l_n x_n.$$

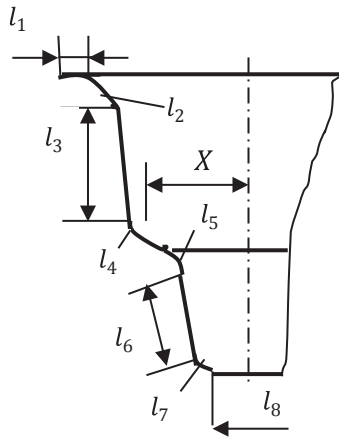


Рис. 6.23. Расчетный контур детали

Зная  $\Sigma LX$ , определяют диаметр искомой заготовки по формуле (6.29).

Поверхность детали с криволинейной образующей можно найти следующим образом: элемент кривой, описывающий поверхность, будет

$$dM = 2\pi x dS,$$

поверхность же, описываемая всей кривой, у которой ординаты начальной и конечной точки  $A$  и  $B$ ,  $y_1$  и  $y_2$ , а центр тяжести в точке  $C$ , может быть определена из выражения

$$M = \int_{y_1}^{y_2} dM = 2\pi \int_{y_1}^{y_2} x ds = 2\pi \int_{y_1}^{y_2} x \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dy.$$

Для деталей, имеющих разную толщину стенок и дна, расчет производят по равенству объемов или весов заготовки и детали. В этом случае формула для расчета диаметра заготовки имеет вид

$$D = \sqrt{\frac{4V_{\text{заг}}}{\pi S}} = 1,13 \sqrt{\frac{V_{\text{заг}}}{S}},$$

где  $V_{\text{заг}}$  — объем заготовочного кружка с учетом отходов при обрезке,  $\text{мм}^3$ .

Припуск на обрезку принимается равным 8–10 % высоты деталей при  $h < 50$  мм, 5–6 % при  $h = 50 \dots 150$  мм и 4–5 % при  $h = 150 \dots 250$  мм.

Диаметры заготовок, рассчитанные тем или иным способом для деталей сложной формы или независимо от формы, не подвергающихся

после вытяжки обрезке, являются только предварительными. Окончательный выбор величины  $D$  зависит от материала заготовки, ее толщины, усилия прижима, радиуса матрицы, скорости вытяжки, вида смазочного материала и пр. Диаметр заготовки окончательно устанавливают экспериментально. При необходимости экспериментальной проверки размера заготовки вначале изготавливают вытяжные штампы, заготовку вырезают вручную по разметке и только после проверки и окончательного установления размера изготавливают штамп для вырезки заготовки.

**Деформирующее усилие.** Максимальное усилие вытяжки можно определить по формуле

$$P_{\max} = 2\pi r s \sigma_{p \max}, \quad (6.30)$$

где  $r$  — наружный диаметр вытягиваемой детали.

Подставляя значение  $\sigma_{p \max}$  в выражение (6.30), согласно выражению (6.28) можно получить формулу для определения деформирующего усилия с прижимом и без прижима заготовки на первом и последующих переходах вытяжки.

В случаях подбора оборудования для вытяжки по силовому параметру, деформирующее усилие определяют по упрощенным формулам. Например, усилие вытяжки можно определить как произведение наибольшего по очагу пластической деформации радиального растягивающего напряжения, возникающего в идеальных условиях вытяжки, на площадь поперечного сечения детали диаметром  $d$ . В этом случае формула для определения деформирующего усилия примет вид

$$P_{\text{в}} \cong \pi s (K_{\text{в}} - 1) \sigma_{\text{в}},$$

где  $K_{\text{в}}$  — предельная степень вытяжки.

Деформирующее усилие можно определить как произведение временного сопротивления разрыву  $\sigma_{\text{в}}$  на площадь поперечного сечения вытягиваемой детали [3]

$$P_{\text{в}} \cong \xi \pi \sigma_{\text{в}} ds,$$

где  $\xi$  — поправочный коэффициент, значение которого зависит от степени деформации, относительной толщины заготовки и порядкового номера перехода вытяжки. Коэффициент  $\xi$  определяют по таблицам, составленным на основании обобщения экспериментальных данных.

Для первого перехода вытяжки  $\xi_1 = 0,28 \dots 1,1$ , для второго  $\xi_2 = 0,15 \dots 1,1$  и т. д. Значение  $\xi$  увеличивается с увеличением степени деформации и относительной толщины заготовки.

**Усилие прижима.** Усилие прижима заготовки должно удовлетворять двум условиям: оно должно быть настолько большим, чтобы вызвать отрыв дна стакана при вытяжке, но не настолько малым, чтобы образовались складки в зоне пластической деформации фланца заготовки. Приблизненно усилие прижима  $Q$  можно представить как произведение среднего удельного усилия  $q$  на площадь фланца детали  $F_\phi$ , которая находится под прижимом в начальный момент вытяжки

$$Q = qF_\phi.$$

При вытяжке цилиндрических деталей из плоской заготовки, усилие прижима будет

$$Q = 0,785 \left[ D^2 - (d + 2r_m)^2 \right] q.$$

При последующих переходах вытяжки, усилие прижима можно определить по похожей формуле

$$Q = 0,785 \left[ d_{n-1}^2 - (d_n + 2r_m)^2 \right] q,$$

где  $d_{n-1}$  и  $d_n$  — диаметры полуфабрикатов на предыдущем и последующем переходах вытяжки;  $n$  — порядковый номер перехода вытяжки;  $r_m$  — радиус скругленной кромки матрицы.

Удельное (среднее) усилие  $q$  прижима зависит в основном от характеристик механических свойств материала заготовки, ее толщины, а также от степени деформации;  $q = 4,5 \dots 0,8$  МПа: чем тоньше заготовка и больше степень вытяжки  $K_B = \frac{D}{d}$ , тем больше удельное усилие прижима.

Хорошие результаты получаются при расчете начального давления прижима по формуле Зибеля

$$Q = 0,25 \left[ \left( \frac{D}{d} - 1 \right)^3 + 0,5 \frac{d}{100s} \right] \sigma_B.$$

В процессе вытяжки усилие прижима, обеспечивающее отсутствие складок, изменяется с уменьшением ширины фланца вытягиваемой детали и зависит от итоговой степени деформации, толщины и ха-

рактических механических свойств материала заготовки. Чем выше степень деформации при вытяжке, тем тщательнее должна быть настройка процесса по зазору между зеркалом матрицы и зеркалом прижимного кольца штампа.

**Работа деформирования. Мощность.** Для подбора прессы для вытяжки необходимо знать не только величину наибольшего усилия, но и работу, совершаемую при вытяжке.

Работа деформирования при вытяжке равна произведению деформирующего усилия  $P_B$  на путь пуансона  $H$  в процессе вытяжки

$$A = \int_0^H P_B dh = 2\pi rs \int_0^H \sigma_{p \max} dh,$$

подставив в эту формулу соотношение (6.28) для  $\sigma_{p \max}$ , можно определить работу деформирования при вытяжке.

$$A = \pi r^2 (K_B - 1) s \sigma_s \left[ \ln K_B - \frac{K_B^2 - 1}{4K_B^2} + \frac{2\mu Q}{\pi rs (K_B + 1) \sigma_s} + \frac{s}{2r_m + s} \right] (1 + 1,6\mu),$$

где  $K_B$  — степень вытяжки,  $K_B = \frac{D}{d}$ . Здесь  $D$  — диаметр заготовки;  $d$  — диаметр вытягиваемой детали.

Анализ данной формулы показывает, что работа деформирования при вытяжке увеличивается с увеличением степени вытяжки  $K_B$ , коэффициента трения  $\mu$ , усилия прижима  $Q$ , толщины заготовки  $s$  и радиуса вытягиваемой детали  $r$ . При  $K_B = 1$ ,  $A = 0$ .

Определить работу деформирования можно по упрощенному варианту. Для определения работы нужно знать характер изменения усилия во время хода прессы с тем, чтобы подсчитать площадь диаграммы  $P_B = h$ . Величиной площади и будет работа, совершаемая пуансоном при вытяжке. Приблизительно принимают, что работа  $A$ , затрачиваемая на вытяжку, составляет

$$A = k P_{\max} h,$$

где  $k$  — коэффициент, определяемый в зависимости от степени вытяжки;  $P_{\max}$  — наибольшее усилие вытяжки;  $h$  — ход пуансона. Принимают следующие значения  $k$  в зависимости от степени вытяжки  $K_B$ :

$K_B$ .....	1,8	.....	1,67	.....	1,54	.....	1,43	.....	1,33	.....	1,25
$k$ .....	10,8	.....	10,77	.....	10,74	.....	10,70	.....	10,67	.....	10,64

Эффективную мощность  $N_{\text{э}}$ , мощность на маховике  $N$  и мощность  $N_{\text{дв}}$  электродвигателя определяют по формулам

$$N_{\text{э}} = \frac{An}{60 \cdot 75}; \quad N_{\text{э}} = \frac{1,3An}{60 \cdot 75\eta};$$

$$N_{\text{дв}} = N/1,36\eta_1,$$

где  $n$  — число ходов в минуту;  $\eta$  — КПД равный 0,6–0,7;  $\eta_1$  — КПД передачи к электродвигателю.

**Предельная степень деформации (предельный коэффициент вытяжки).** Степень деформации при вытяжке характеризуется относительным сокращением площади поперечного сечения вытягиваемой детали при приблизительно неизменной толщине стенки, отсюда степень деформации при вытяжке за одну операцию будет

$$\varepsilon = \frac{F_{\text{заг}} - F_{\text{д}}}{F_{\text{заг}}} = \frac{\pi Ds - \pi ds}{\pi Ds},$$

или

$$\varepsilon = \frac{D-d}{D} = 1 - \frac{d}{D}, \quad (6.31)$$

где  $s$  — толщина стенки;  $D$  — диаметр заготовки;  $d$  — диаметр детали.

При вытяжке за несколько переходов степень деформации за каждый переход определяется по аналогичной формуле

$$\varepsilon = \frac{d_{N-1} - d_N}{d_{N-1}} = 1 - \frac{d_N}{d_{N-1}},$$

где  $d_{N-1}$  — диаметр полуфабриката на предыдущем переходе;  $d_N$  — диаметр стакана на последующем переходе.

Для оценки степени деформации при вытяжке вводят параметр  $m$ , который называется коэффициентом вытяжки [7, 8]. Он представляет собой отношение диаметра детали к диаметру заготовки

$$m = \frac{d}{D},$$

тогда  $\varepsilon = 1 - m$ . Обратная коэффициенту вытяжки величина  $K = \frac{D}{d}$  называется степенью вытяжки.

Степень деформации и степень вытяжки, как следует из формулы (6.31), связаны зависимостью

$$\varepsilon = \frac{K-1}{K},$$

из которой следует, что чем больше степень деформации (и, следовательно, относительное сокращение диаметра вытягиваемого полуфабриката), тем значение  $K$  больше.

Существует предельная (критическая) степень деформации  $\varepsilon_{\text{пр}}$  и, следовательно, предельная степень вытяжки  $K_{\text{пр}}$  (предельный (критический) коэффициент вытяжки  $m_{\text{пр}}$ ), при которой напряжения в опасном сечении вытягиваемого полуфабриката близки к разрушающим. При проектировании процессов листовой штамповки, эти параметры являются важнейшими. От их правильного выбора зависит как качество изделий, так и возможность полного использования способностей материала к деформированию. Это оказывает влияние на число переходов, стоимость оснастки и т. д.

Определить предельную степень вытяжки (предельный (критический) коэффициент вытяжки) теоретическим путем сложно. Сложность заключается в том, что эта величина зависит от многих факторов: формы и размеров вытягиваемой детали, механических свойств вытягиваемого материала, состояния его поверхности, толщины, конструктивных особенностей инструмента, состояния поверхностей рабочих деталей вытяжного штампа и т. п. Степень влияния этих факторов может быть установлена лишь приближенно вследствие ряда допущений, применяемых в анализе напряженно-деформированного состояния. Кроме того, теоретическое решение вычисления предельного коэффициента вытяжки будет зависеть от принятого критерия разрушения металла при вытяжке и в большинстве случаев получить результат в виде аналитической функции не удастся.

Одно из аналитических решений по принятию предельной степени вытяжки для первой операции штамповки с прижимом заготовки в цилиндрической матрице с радиальной заходной частью было получено с учетом упрочнения металла, контактных сил трения и изгибных напряжений [5]

$$K = \exp \left[ 0,9 \left( \frac{1}{1+1,6\mu} - \frac{s}{2r_m + s} - \frac{\mu Q}{\pi R s \sigma_B} \right)^{1-\psi_p} \right]. \quad (6.32)$$



Здесь принято условие разрушения  $\sigma_{p \max} = \sigma_b$ .

Из уравнения (6.32) следует, что предельная степень вытяжки (предельный коэффициент вытяжки  $m_{пр}$ ) зависит от прочностных и пластических свойств металла заготовки, условий трения между фланцем заготовки и поверхности прижима и матрицы, усилия прижима, толщины материала, радиуса матрицы.

Величина  $K_{пр}$  увеличивается с повышением пластических свойств материала заготовки (с увеличением разницы между  $\sigma_b$  и  $\sigma_t$ ). При вытяжке с прижимом коэффициент вытяжки меньше на 5–8 %, чем при вытяжке без прижима.

Предельная степень вытяжки зависит также от передаваемого пуансоном заготовке усилия. С уменьшением толщины листового материала увеличиваются потери на трение и, хотя усилие вытяжки остается постоянным, допустимая степень деформации снижается. Таким образом, предельный коэффициент вытяжки определяется не только обрабатываемым материалом, но в первую очередь относительной толщиной материала  $\frac{s}{D}$ .

На рис. 6.24 представлена зависимость степени вытяжки  $K_{пр}$  от отношения  $\frac{s}{D}$  [3, 5].

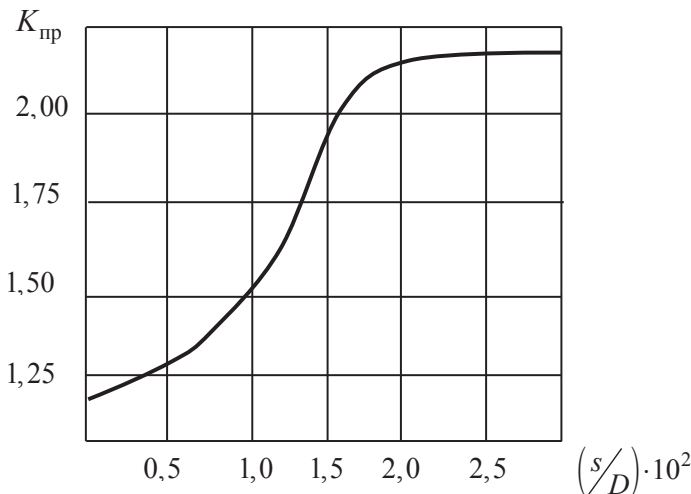


Рис. 6.24. График для определения предельного коэффициента вытяжки без прижима

Кривая имеет восходящий характер до  $\frac{s}{D} \approx 0,02$ . При относительно малой толщине заготовки, формоизменение без прижима ограничивается потерей устойчивости фланца в результате образования гофров (складок), а при относительно большой толщине — локализацией деформации и разрывом металла в области контакта стенки вытягиваемого стакана с закруглением у дна пуансона. Первое явление соответствует восходящей части кривой, а второе — горизонтальной ее части (рис. 6.25).

Предельные значения степени вытяжки для области  $\frac{s}{D} > 0,02$  составляют  $K_{\text{пр}} = 2,32 \dots 2,22$  ( $m = 0,43 \dots 0,45$ ).

Предельная степень вытяжки повышается с повышением чистоты поверхности матрицы и прижимного кольца, применения смазочных материалов.

Малый радиус входного закругления на матрице затрудняет вытягивание в нее заготовки, вызывает в матрице высокие напряжения, может привести к отрыву дна. Увеличение радиусов закругления кромок матрицы и пуансона увеличивает степень вытяжки при всех прочих равных условиях процесса.

Радиусы закругления на вытяжной матрице для первой вытяжки цилиндрического стакана можно определить по формуле

$$r_m = 0,05[50 + (D - d)]\sqrt{s},$$

где  $D$  — диаметр заготовки, мм;  $d$  — диаметр детали, мм;  $s$  — толщина материала, мм.

Хорошие результаты дает расчет закруглений на матрице по формуле

$$r_m = 0,5(0,73D - d - 2z),$$

где  $z$  — зазор на сторону между пуансоном и матрицей.

Радиусы закруглений на вытяжных матрицах для последующих вытяжных переходов определяются по формуле

$$r_{m1} = (0,7 \dots 0,8)r_{m1}.$$

Однако чрезмерное увеличение радиуса закругления матрицы приводит к уменьшению площади заготовки, находящейся под прижимным кольцом штампа, что может привести к образованию гофров (складок). Исследования показывают, что увеличение радиуса закругления матрицы свыше 6–10 толщин заготовки не дает существенного

увеличения  $K$ . Поэтому обычно значения радиусов скругления рабочей кромки матрицы принимают равными 6–10 толщинам заготовки, меньшие значения — для металла толщиной более 4 мм, а большие — для более тонкого металла.

На предельное формоизменение при вытяжке положительно сказывается анизотропия механических свойств холоднокатаного листа. При коэффициенте нормальной анизотропии  $R^* > 1$ , металл хорошо сопротивляется утонению, предельное формоизменение за одну операцию увеличивается.

При анализе влияния анизотропии на характеристики вытяжки принимают во внимание минимальный коэффициент анизотропии  $R_{\min}^*$  (рис. 6.25), поскольку предельное состояние — утонение возникает между фестонами, во впадине, т. е. в направлении  $R_{\min}^*$ .

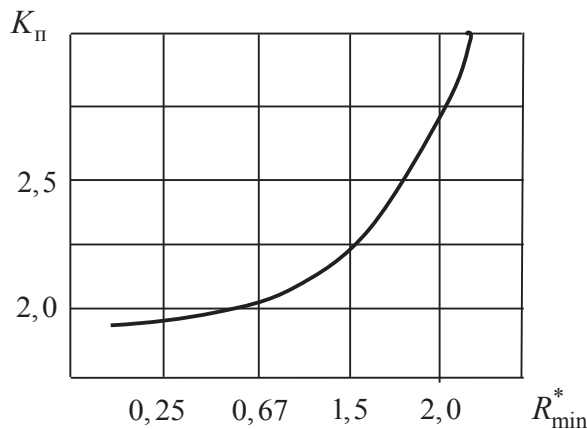


Рис. 6.25. Зависимость предельной степени вытяжки  $K_{\text{п}}$  от коэффициента нормальной анизотропии  $R_{\min}^*$

Степени вытяжки, полученные расчетным путем, являются предельными (критическими) (см. рис. 6.25). Для создания некоторого запаса устойчивости расчетные значения степени вытяжки необходимо уменьшить на 10–15 %. С учетом этого допустимая степень вытяжки будет

$$K_{\text{доп}} = \frac{K_{\text{п}}}{1,1 \dots 1,15}.$$

Допустимые степени вытяжки могут быть определены на основании экспериментов и производственных данных. В справочной лите-

ратуре имеются специальные таблицы для определения допустимых коэффициентов вытяжки, широко применяемые в инженерной практике. В некоторых работах коэффициенты вытяжки приводятся в виде отношений  $m = \frac{d}{D}$  или  $m = \frac{d_N}{d_{N-1}}$ , поэтому их значения меньше едини-

цы. Связь между  $K$  и  $m$  следующая:  $m = \frac{1}{K}$ .

В случае многопереходной вытяжки без межоперационных отжигов, величина  $K$  уменьшается при увеличении порядкового номера перехода  $N$  вследствие возрастания упрочнения материала заготовки. Однако разница в значении  $K$  существенна лишь на первом и втором переходах вытяжки ( $K_1 > K_2$ ). При выполнении последующих переходов, величина  $K$  изменяется незначительно и можно считать, что  $K_2 \cong K_3 \cong \dots \cong K_N = \text{const}$ , поскольку с увеличением степени деформации интенсивность упрочнения металла затухает.

**Определение числа переходов и размеров полуфабрикатов при вытяжке цилиндрических деталей.** Число операций, необходимое для получения готовой детали, зависит от ее высоты, диаметра, относительной толщины заготовки и механических свойств материала. Проектируемый технологический процесс должен содержать минимально возможное число операций. Это обеспечивается на каждой операции таким изменением поперечного сечения заготовки и таким уменьшением толщины стенки в опасном сечении, что напряжения и деформации, возникающие в материале, не приводят к его разрушению.

Суммарное значение степени вытяжки за  $n$  число операций определяется по выражению

$$K = \frac{D}{d_n},$$

где  $D$  — диаметр заготовки;  $d_n$  — диаметр цилиндрического участка оболочки, вытягиваемой на  $n$ -й операции.

Если известны допустимые степени вытяжки для первой и последующих операций (определенные расчетом или принятые согласно экспериментальным данным), диаметры полуфабрикатов по переходам вытяжки определяются согласно следующим соотношениям (рис. 6.26):

$$d_1 = \frac{D}{K_1}; \quad d_2 = \frac{d_1}{K_2}; \quad d_3 = \frac{d_2}{K_3} = \frac{D}{K_1} K_2 K_3.$$

Учитывая, что при вытяжке без отжигов между операциями  $K_2 \cong K_3 \cong \dots \cong K^*$ ,

$$d_2 = \frac{D}{K_1} K^*; \quad d_3 = \frac{D}{K_1 (K^*)^2}; \quad d_N = \frac{D}{K_1 (K^*)^{N-1}}, \quad (6.33)$$

где  $N$  — число переходов (операций) вытяжки.

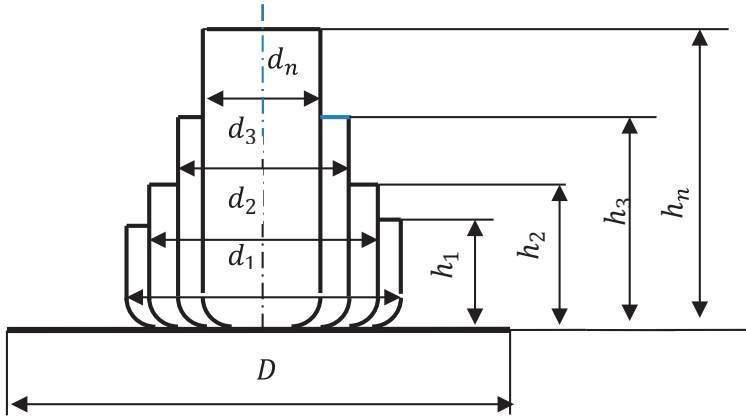


Рис. 6.26. Схема к определению числа переходов (операций) вытяжки

Более точно  $K^*$  определяется как среднеарифметическое значение коэффициентов вытяжки на последующих переходах (табл. 6.7)

$$K^* = \frac{K_2 + K_3 + \dots + K_N}{N - 1}.$$

Для определения числа переходов можно использовать соотношение (6.33). Прологарифмировав его, получим

$$N = 1 + \frac{\lg d_N - \lg \frac{D}{K_1}}{\lg \frac{1}{K^*}}.$$

Определив диаметры полуфабрикатов после каждой операции вытяжки и задавшись радиусом закругления кромки пуансона  $r_{\text{п}}$ , определяют высоты полуфабрикатов ( $h_1, h_2, \dots, h_N$ ) из условия равенства площади поверхности заготовки и детали

$$0,785D^2 = F_1 = F_2 = \dots = F_N,$$

где  $F_1, F_2, \dots, F_N$  — площади поверхности полуфабрикатов после каждой операции вытяжки.

Таблица 6.7

**Коэффициенты вытяжки цилиндрических оболочек  
с прижимом на тороидальной матрице**

Коэффициент вытяжки $K_i$	Относительная толщина заготовки $\frac{s}{D} \cdot 100$				
	2–1,5	1,5–1,0	1,0–0,6	0,6–0,3	0,3–0,1
$K_1$	1,88–1,96	1,78–1,88	1,72–1,78	1,66–1,72	1,61–1,66
$K_2$	1,28–1,31	1,26–1,28	1,23–1,26	1,21–1,23	1,20–1,28
$K_3$	1,25–1,26	1,23–1,25	1,21–1,23	1,20–1,21	1,17–1,20
$K_4$	1,19–1,21	1,17–1,19	1,16–1,17	1,14–1,16	1,12–1,14
$K_5$	1,14–1,17	1,09–1,14	1,08–1,09	1,07–1,08	1,06–1,07

Высоту цилиндрического полуфабриката без фланца можно определить с учетом припуска на обрезку  $\Delta H$  неровного края по формуле

$$H = \frac{D^2 - d_1^2 - 2r_{\pi}(\pi d_1 + 4r_{\pi})}{4d} + r_{\pi} - \Delta H, \quad (6.34)$$

где  $r_{\pi}$  — радиус пуансона.

Высоты полуфабрикатов по переходам вытяжки приближенно определяются по формуле (6.34), в которой принято  $r_{\pi} = 0$  и  $\Delta H = 0$ . В таком случае она принимает вид

$$H_N = \frac{D^2 - d_N^2}{4d_N},$$

где  $d_N$  — диаметр полуфабриката после  $N$  переходов.

Радиусы закругления на пуансонах для первой вытяжки составляют обычно  $r_{\pi} = (0,5 \dots 1,0)r_{\text{м1}}$  ( $r_{\text{м1}}$  — радиус матрицы), а для промежуточных желательно, чтобы они были равны  $r_{\pi} = 0,5(d_{n-1} \dots d_n)$ . Для последней вытяжки радиус на пуансоне берется по чертежу вытягиваемой детали ( $d_{n-1}, d_n$  — диаметры полуфабрикатов). При значительном перепаде размеров диаметров предыдущей и последующей операций, закругления на пуансоне предыдущей операции, чтобы предотвратить образование кольцевых следов на боковой поверхности детали, следует выполнять двумя радиусами.

### 6.4.3. Вытяжка осесимметричных нецилиндрических деталей

Вытяжкой можно получать осесимметричные детали, по форме отличающиеся от цилиндрических деталей. Например, детали с широким фланцем, ступенчатые, конические, сферические, с криволинейной образующей и т. п. Изготовление таких деталей представляет некоторые трудности в отличие от вытяжки цилиндрических деталей, поскольку условия формоизменения при изготовлении таких деталей менее благоприятны, чем условия вытяжки цилиндрических деталей. В связи с этим при штамповке осесимметричных деталей, которые отличаются по форме от цилиндрических деталей, применяют определенные приемы, позволяющие получить их без разрушения.

**Детали с широким фланцем.** Цилиндрические детали с фланцем представляют собой изделие незавершенной вытяжки, когда плоская заготовка не полностью протягивается через матрицу. Особенность технологии вытяжки деталей с широким фланцем в том, что после первой операции получают диаметр фланца, предусмотренный чертежом детали (с припуском на обрезку). На всех последующих операциях этот диаметр остается неизменным. Формоизменение происходит вследствие уменьшения диаметра цилиндрической части полуфабриката, увеличения ширины фланца и высоты детали (рис. 6.27).

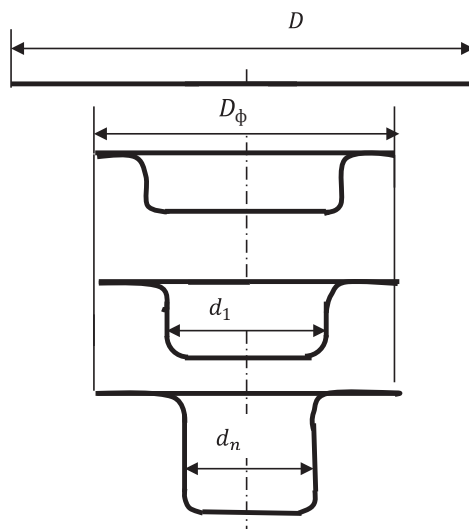


Рис. 6.27. Переходы вытяжки деталей с широким фланцем

В тех случаях, когда степень вытяжки  $K = \frac{D}{d}$  меньше или равна допустимой на первом переходе изготовления цилиндрического стакана, изготовление детали с фланцем не представляет трудности. В этом случае напряжение  $\sigma_{p \max}$  на протяжении всего процесса вытяжки не достигает значения, способного вызвать разрушение заготовки. Процесс вытяжки может быть остановлен в любой промежуточной фазе деформирования и при любом значении диаметра фланца (в пределах  $d < D_{\phi} < D$ ). В тех случаях, когда коэффициент вытяжки, необходимый для изготовления детали, больше допустимого для первого перехода вытяжки цилиндрической детали, возможное формоизменение заготовки становится ограниченным. Вытяжка деталей, при которой на первом переходе значение коэффициента вытяжки таково, что полное протягивание заготовки через матрицу невозможно, называется вытяжкой детали с широким фланцем.

При проектировании технологического процесса изготовления деталей с широким фланцем, в первую очередь следует проверить возможность изготовления заданной детали в один переход вытяжки. Если вытяжка на проход невозможна, то допустимо некоторое уменьшение диаметра заготовки без ее разрушения.

При малом размере фланца, число вытяжных операций и размеры полуфабрикатов рассчитываются так же, как и для вытяжки цилиндрических полых изделий без фланца. Для деталей с широким фланцем наибольшее допустимое отношение глубины первой вытяжки к диаметру  $\frac{h_1}{d_1}$  приводится в справочной литературе [3, 7]. Детали, у которых это отношение больше допустимого, вытягиваются за несколько операций.

Число операций  $n$  для получения цилиндрической детали с широким фланцем рассчитывается по формуле

$$N = \frac{\lg d_n - \lg(m_1 D)}{\lg m_{cp}},$$

где  $m_1$ ,  $m_{cp}$  — коэффициент вытяжки на первой операции и средний коэффициент вытяжки,  $m_1 = \frac{1}{K_1}$ ,  $m_{cp} = \frac{1}{K_{cp}}$ . Здесь  $K_1$ ,  $K_{cp}$  — степень вытяжки на первой операции и средняя степень вытяжки.



Высоту вытяжки после первой операции  $h_1$  можно рассчитать по формуле

$$h_1 = \frac{D^2 - D_{\Phi}^2}{4d_1} + 0,86r_n.$$

При последующих операциях высота полупродукта определяется по формуле

$$h_n = K_n + 0,86r_n,$$

где  $K_n$  — коэффициент вытяжки,  $K_n = \frac{d_{n-1}}{d_n}$ ;  $r_n$  — радиус полуфабрикатов по переходам вытяжки.

При определении размеров промежуточных вытяжек необходимо руководствоваться следующими положениями.

1. После первой вытяжки диаметр фланца должен быть равен требуемому с учетом припуска на обрезку. При последующих вытяжках (после первой) он не подвергается значительным изменениям.

2. За первую операцию необходимо вытягивать на 5–10 % больше (по поверхности металла), чем это требуется для окончательно вытянутой детали. В процессе второй и последующих операций, излишек металла нужно перегонять из центральной части во фланец с таким расчетом, чтобы диаметр фланца оставался неизменным.

3. При изготовлении крупных деталей с фланцем, высота полуфабриката по операциям изменяется незначительно или совершенно не изменяется, собственно же вытяжка получается за счет изменения радиусов закругления.

4. При изготовлении деталей малых и средних радиусов высота полуфабрикатов по операциям постепенно увеличивается, а радиусы закругления изменяются незначительно.

5. При изготовлении деталей с отношением  $\frac{D_{\Phi}}{d_n} = 1,1 \dots 1,4$  при  $\frac{h_n}{d_n} > 1$

( $h_n$  — высота детали;  $d_n$  — диаметр детали), т. е. деталей с небольшим фланцем, в процессе первой операции получают цилиндрическую заготовку без фланца; в процессе промежуточных операций вытяжки образуется конический фланец, который в процессе вытяжки правят на плоскость.

Многопереходную вытяжку деталей с широким фланцем можно осуществлять также вытяжкой с одновременным проталкиванием заготовки силой, приложенной к торцовому участку заготовки, и правкой фланца в конечный момент вытяжки. При данном способе, при

проталкивании, создаются осевые сжимающие напряжения, которые разгружают опасное сечение детали. Это позволяет вести процесс без межоперационных отжигов с высокой степенью деформации на многопозиционных листоштамповочных автоматах.

**Вытяжка ступенчатых деталей.** Ступенчатые (рис. 6.28) детали получают, как правило, многооперационной вытяжкой. Первую ступень диаметром  $d_1$  вытягивают из плоской заготовки за одну или несколько операций, после чего диаметр  $d_1$ , как и диаметр фланца  $D_{\phi}$  (если он предусмотрен чертежом детали), остаются неизменными. Последующие ступени диаметром  $d_2$ ,  $d_3$  и т. д. получают в результате перераспределения металла по аналогии с технологией штамповки деталей с широким фланцем. Высоты полуфабрикатов по операциям вытяжки определяют из условия равенства площадей поверхностей. При этом необходимо исходить из того факта, что отсутствие избытка высоты полуфабриката, полученного на предыдущей операции, приводит к отрыву дна на последующей операции. Избыток (3–5 %) поверхности полуфабриката, вытягиваемого в матрицу, исключает возможность отрывов. Этот избыток должен учитываться при расчете высот полуфабрикатов.

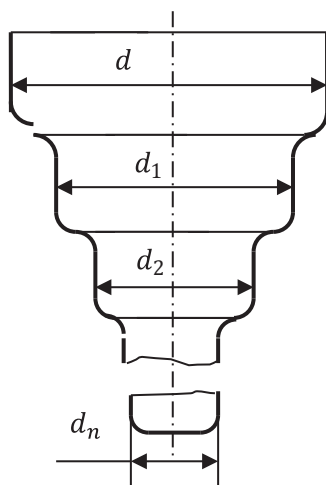


Рис. 6.28. Ступенчатые детали

При разработке технологического процесса вытяжки ступенчатых полых деталей необходимо оценить возможность получения заданной детали за одну операцию или же необходимость выполнения несколь-

ких операций вытяжки. В последнем случае требуется определить последовательность операций (переходов) вытяжки.

Существует эмпирическая формула для определения итогового коэффициента вытяжки ступенчатой детали

$$K_{\text{пр}} = \frac{\frac{h_1}{h_2} + \frac{h_2}{h_3} + \dots + \frac{h_{n-1}}{h_n} + 1}{\frac{h_1}{h_2} \frac{d_1}{D_0} + \frac{h_2}{h_3} \frac{d_2}{D_3} + \dots + \frac{h_{n-1}}{h_n} \frac{d_{n-1}}{D_0} + \frac{d_n}{D_0}},$$

где  $h_n$  и  $d_n$  — высоты и диаметры ступеней, начиная со ступени наибольшего диаметра;  $D_0$  — диаметр заготовки.

Если  $K < K_{\text{пр}}$ , штамповка ступенчатой детали возможна за одну операцию.

Если вытянуть деталь за одну операцию нельзя, общее число вытяжных операций определяют исходя из отношения наименьшего диаметра вытягиваемой ступенчатой детали к начальному диаметру заготовки.

Размеры и форму промежуточных вытяжек определяют следующим образом. Сначала вытягивают ступени больших диаметров, а затем меньших, постепенно увеличивая их высоты, если разница между ступенями по диаметру большая, то вначале вытягивают внутренние элементы, а затем наружные.

Независимо от формы вытягиваемой детали, объем вытягиваемого металла на всех операциях должен быть равен объему металла окончательно оформленной детали.

При наличии у штампуемой детали допусков по 2-му или 3-му классу точности, вводится дополнительная операция калибровки соответствующих поверхностей детали до требуемых размеров. Калибровка проводится на специальных калибровочных штампах.

**Вытяжка конических деталей.** Конические детали имеют форму усеченного конуса (рис. 6.29).

Число вытяжных операций, размеры и форма промежуточных полуфабрикатов при условии, что деталь изготавливается за несколько операций, зависят от конфигурации детали, соотношения параметров и механических свойств детали.

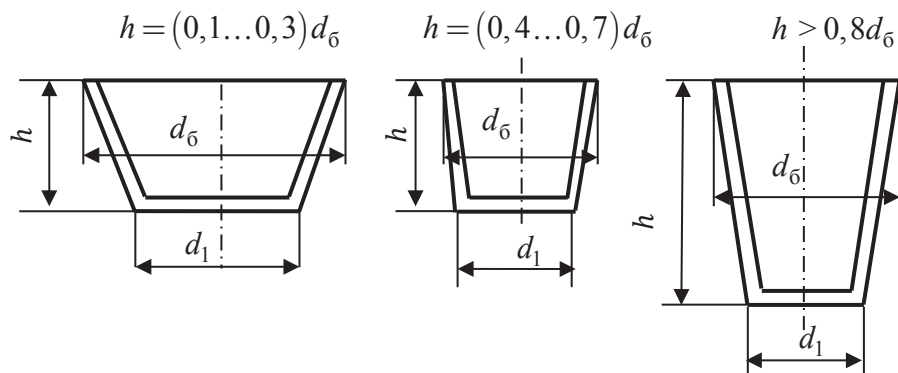


Рис. 6.29. Конические детали малой высоты

Если высота детали  $h \leq (0,1...0,3)d_6$  ( $d_6$  — большой диаметр конуса), а угол образующей с вертикалью  $50\text{--}80^\circ$  при условии хорошей пластичности материала, то деталь вытягивается за одну операцию.

Если относительная толщина заготовки  $\frac{s}{D} \cdot 100 > 2,5$ , вытяжка производится без прижима, а если  $\frac{s}{D} \cdot 100 < 2$ , то с прижимом.

При вытяжке деталей этой группы, кроме образования складок, возможна потеря формы из-за пружинения. В связи с этим необходимо создавать увеличенный прижим заготовки. Это достигается путем использования в штампах перетяжных ребер или порогов, расположенных по краю рабочей полости матрицы, конического прижима или прижима, состоящего из нескольких колец с конической поверхностью, получающего перемещение от пружины. Для деталей с большим фланцем перетяжные ребра устанавливаются на прижиме. Однако отладка такого прижима является трудоемкой.

Если высота конической детали  $h = (0,4...0,7)d_6$  и фланец отсутствует или его размеры малы при относительно толстом материале, вытяжка производится за одну операцию. Если же относительная толщина материала мала и деталь имеет фланец, она изготавливается в нескольких операциях.

Если коническая деталь не имеет фланца, а ее высота  $h > 0,8d$  ( $d$  — наименьший диаметр детали) и угол между образующей и осью менее  $30^\circ$ , вытяжка происходит за несколько операций.

Существует два способа вытяжки деталей подобного типа. Первый способ получил название способа последовательных цилиндров. Его

применяют при малых углах конусности  $\alpha$  и значениях  $\frac{h}{d_2}$ , при которых степень  $K = \frac{d_1}{d_2}$  вытяжки не превышает значений, допустимых для

последующих переходов вытяжки цилиндрических стаканов. Согласно этому способу сначала вытягивают цилиндрический колпачок, диаметр которого примерно соответствует диаметру основания конуса детали  $d_1$ , а затем уже за несколько операций вытягивают ступенчатый колпачок, профиль которого вписан в контур готовой детали. На конечной операции в калибрующем штампе разглаживают ступени, т. е. придают детали окончательную форму. Перед калибровкой рекомендуется осуществить отжиг.

Недостаток этого способа вытяжки конических деталей в том, что толщина стенки детали по высоте неодинакова, деталь имеет разностенность и искривленность образующей. На поверхности детали остаются кольцевые отпечатки — следы многоступенчатой вытяжки.

Второй способ изготовления конических полых деталей получил название способа параллельных конусов. При этом способе промежуточные полуфабрикаты имеют форму конуса и цилиндра, причем на каждой последующей операции поверхность конуса за счет уменьшения поверхности цилиндра увеличивается до образования полного конуса. Это обуславливает одинаковые наклоны и ровную поверхность стенок детали.

Число операций для получения полый конической детали по способу параллельных конусов определяют следующим образом.

Сначала вытягивается цилиндр, поверхность которого равна поверхности детали, а диаметр — большому диаметру конуса. Число операций на этой стадии процесса определяется так же, как и для обычных цилиндрических деталей без фланца. Затем вытягивается конусная поверхность.

Допустимый зазор  $z$  зависит от коэффициента вытяжки и относительной толщины  $\frac{s}{d_n} \cdot 100$ :

$$z = 8s \text{ при } K \leq 1,25 \text{ и } \frac{s}{d_n} \cdot 100 \leq 1 \%;$$

$$z = 10s \text{ при } K \leq 1,1 \text{ и } \frac{s}{d_n} \cdot 100 \leq 2 \%.$$

Радиус перехода  $r_{\text{дн}}$  от дна к стенке принимается равным  $8s$ . Диаметр плоской части дна предыдущей заготовки не должен превышать диаметр такой же части последующей заготовки. Радиус перехода от дна к стенке на предпоследней вытяжке должен быть равен соответствующему равенству готовой детали. Предельная высота  $h$  конической детали, получаемой вытяжкой, рассчитывается по формуле

$$h \leq \frac{0,5 \frac{\sigma_{\text{в}}}{\sigma_{\text{т}}} d_{\text{дн}}}{\text{tg}(\alpha + \mu)},$$

где  $d_{\text{дн}}$  — диаметр дна детали, мм;  $\alpha$  — угол наклона стенки детали, град;  $\mu$  — коэффициент внешнего трения детали о стенку матрицы при вытяжке со смазкой, равный 0,1–0,15.

**Вытяжка деталей коробчатой формы.** Рассмотренные выше типы деталей, получаемые вытяжкой, обладали осевой симметрией деформирования, при которой напряжения  $\sigma_{\text{р}}$  и  $\sigma_{\theta}$  являлись функцией только одной координаты и были главными напряжениями. Штамповкой из листа получают значительное количество деталей, при изготовлении которых осевая симметрия деформирования отсутствует. К таким деталям относятся детали коробчатой формы. Они имеют плоские боковые поверхности, сопряженные с цилиндрическими поверхностями радиусом (рис. 6.30).

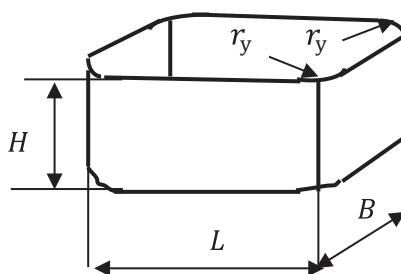


Рис. 6.30. Деталь коробчатой формы

В зависимости от числа операций, необходимых для получения требуемых размеров, такие детали подразделяются на низкие и высокие. Низкие детали вытягиваются за одну операцию, высокие — за две и более операций.

Деталь коробчатой формы считают низкой, если ее относительная высота  $H/B \leq (0,6...0,8)$ , и высокой, если  $H/B > (0,6...0,8)$ . При этом относительный угловой радиус  $r_y^* = \frac{r_y}{B} \geq 0,1$  должен быть не менее 0,1.

При вытяжке деталей коробчатой формы, очаг деформации находится в угловых участках фланца. Он также охватывает зону сопряжения фланца и боковых стенок.

На рис. 6.31 показана часть фланца заготовки при вытяжке коробчатой детали и напряженное состояние на различных участках ее при вытяжке.

На элемент, выделенный в угловой части фланца, действуют нормальные напряжения  $\sigma_r$  и  $\sigma_\theta$ , действующие в радиальном и окружном направлениях. Напряжения  $\sigma_r$ , действующие по нормали к контуру отверстия матрицы, и напряжения  $\sigma_\theta$ , перпендикулярные напряжениям  $\sigma_r$ , не являются главными нормальными напряжениями. На площадках, на которых действуют напряжения  $\sigma_r$  и  $\sigma_\theta$ , одновременно действуют и касательные напряжения  $\tau_{r\theta}$  и по закону парности  $\tau_{\theta r}$ , а деформированное состояние характеризуется не только линейными деформациями  $\varepsilon_r$  и  $\varepsilon_\theta$ , но и сдвигами, т. е. угловыми деформациями. Нормальные и касательные напряжения являются функцией двух координат  $\rho$  и  $\theta$ . Однако интенсивность изменения этих напряжений по координатам различна.

Напряженное состояние углового участка фланца плоское (сжаторастянутое), деформированное состояние объемное. Стенки детали испытывают сложное неравномерное напряженно-деформированное состояние: сжатие вдоль контура и растяжение по высоте (рис. 6.31). Чем выше деталь, тем характер распределения напряжений и деформаций более неравномерен.

Под действием нормальных напряжений в процессе вытяжки элементы угловой части будут испытывать сжатие в тангенциальном направлении и удлинение в радиальном направлении. Кроме того, эти элементы получают сдвиговые деформации в результате действия касательных напряжений. В результате, как и при вытяжке других деталей, ширина фланца в угловой части будет увеличиваться. В то же время фланцы прямолинейных участков контура претерпевают только изгиб на кромке матрицы, практически не удлиняясь в меридиальном направлении.

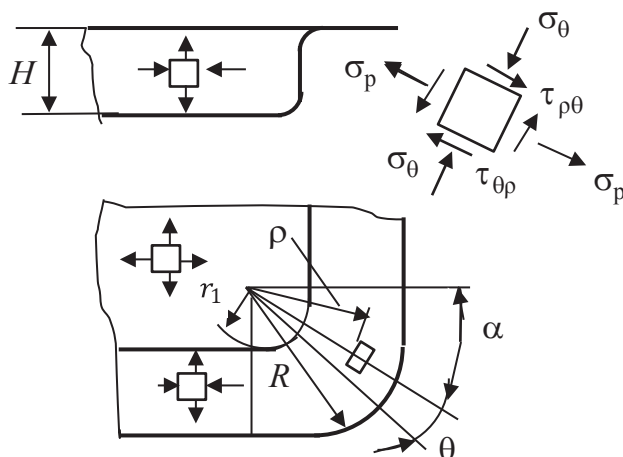


Рис. 6.31. Напряженное состояние различных участков вытягиваемой детали коробчатой формы при вытяжке

Напряжение  $\sigma_p$  на входе в матрицу будет иметь максимальное значение на середине скругления фланца, постепенно убывая по мере приближения к стыку между угловым и прямолинейным участками контура отверстия матрицы. Максимальное значение напряжения  $\sigma_{p \max}$  при  $\theta = 0$  и  $\alpha = \frac{\pi}{4}$  можно определить формуле

$$\sigma_{p \max} = 0,682 \sigma_s \ln \frac{R}{r_y},$$

где  $R$  — радиус фланца;  $r_y$  — радиус закругления между стенками,  $r_y = r_1$ .

Если принять, что  $\sigma_{p \max}$ , то максимальное значение степени вытяжки  $K = \frac{R}{r_y} = e^{\frac{1}{0,682}} = 4,3$ , что значительно больше допустимого коэффи-

циента вытяжки для цилиндрических деталей. Этот вывод хорошо подтверждается практикой: предельно допустимая степень деформации при вытяжке низких коробчатых деталей примерно в 1,5–2 раза выше, чем при вытяжке цилиндрических деталей.

При вытяжке тонкостенных коробчатых деталей, в угловых участках возникают окружные нормальные напряжения  $\sigma_\theta$ , большие, чем напряжения, действующие вдоль прямолинейных участков. В связи с этим при разгрузке возникают различные упругие деформации в угло-



вых и прямолинейных участках, что приводит к появлению сжимающих напряжений, способных вызвать упругий изгиб стенок. Легкое надавливание на стенку коробки в этом случае сопровождается хлопком (так называемым «хлопуном»). Хлопуны можно устранить путем придания при вытяжке стенкам коробки слегка овальной, выпуклой формы или подвергнуть ее правке с растяжением стенок на 2,5–4 % в специальном штампе с раздвижным секторным пуансоном.

Размеры заготовок для деталей коробчатой формы определяют, как и для любого процесса вытяжки, из условия равенства площади поверхности заготовки и вытягиваемой детали. Форма заготовок для коробчатых деталей зависит от соотношения основных размеров детали: относительной высоты  $H/B$ , относительной ширины  $B/L$  и относительного радиуса закругления угловых участков коробки  $r_y/B$ . В зависимости от относительных размеров детали применяют различные способы построения контура заготовок. В справочной литературе приведены рекомендации по определению контура заготовок для вытяжки коробчатых деталей, которые облегчают отыскание оптимальных размеров и конфигураций заготовки.

Методика построения контура заготовки для низких деталей, у которых  $\frac{H}{r_y} < 5$ , заключается в следующем (рис. 6.32).

Контур детали в плане вычерчивают в масштабе, после чего делают развертку прямолинейных участков контура детали на плоскость. Длину развертки  $l$  (считая от плоского участка дна детали) определяют, как обычно при гибке,

$$l = H + 0,57r_{\text{дн}},$$

где  $r_{\text{дн}}$  — радиус закругления в детали от ее дна к стенке.

По формуле, полученной из условия равенства поверхности заготовки и детали, определяют радиус заготовки  $R_0$ , необходимый для получения цилиндра, вписанного в угловой участок коробки

$$R_0 = \sqrt{r_y(r_y + 2H)} - r_{\text{дн}}(0,86r_y + 0,14r_{\text{дн}}),$$

при малом  $r_{\text{дн}}$

$$R_0 = \sqrt{r_y(r_y + 2H)}.$$

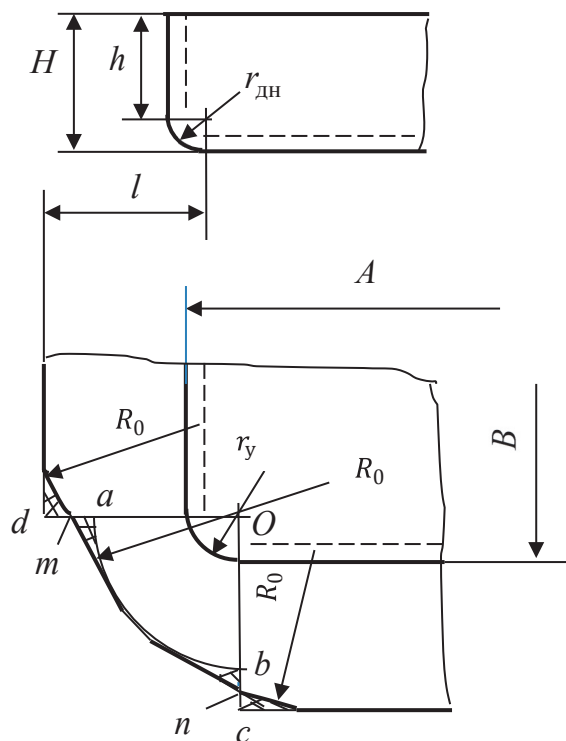


Рис. 6.32. Схема построения угловых участков заготовок для вытяжки низких коробчатых деталей

Из центра  $O$  проводят дугу  $ab$  радиусом  $R_0$  до пересечения с прямыми  $Oc$  и  $Od$ , которые ограничивают прямолинейные участки контура заготовки. Отрезки  $ad$  и  $bc$  делят пополам (точки  $m$  и  $n$  соответственно) и через эти точки проводят касательные к дуге  $ab$ . Касательные, проведенные через точки  $m$  и  $n$ , и прямолинейные участки контура заготовки сопрягают дугами, радиус которых  $R_0$ .

Заштрихованные треугольники на рис. 6.33 равны по площади; таким образом, насколько увеличена заготовка в угловых частях, настолько она уменьшена на прямолинейных участках. Этим соблюдается характерное для вытяжки условие равенства площадей заготовки и детали.

Экспериментально установлено [6, 7], что для изготовления высоких квадратных деталей можно использовать заготовки в форме круга, диаметр которых определяют по условию равенства площадей поверхностей. Если не принимать во внимание радиусы закругления

углов и дна и с учетом этого не назначать припуск на обрезку (что допустимо при приближенных расчетах), то условие равенства поверхностей будет иметь вид

$$0,785D_0^2 = B^2 + 4BH,$$

откуда

$$D_0 = 1,13\sqrt{B(B+4H)}. \quad (6.35)$$

При более точных расчетах, с учетом радиусов закругления угловых участков и дна детали, равных друг другу ( $r_y = r_{\text{дн}} = r$ ), диаметр заготовки определяют по формуле

$$D_0 = 1,13\sqrt{B^2 + 4B(H_{\text{п}} - 0,43r) - 1,72r(H_{\text{п}} + 0,33r)}, \quad (6.36)$$

где  $H_{\text{п}}$  — высота детали с припуском на обрезку.

Заготовка для прямоугольных высоких деталей с относительно большими радиусами закругления ( $\frac{r_y}{B} > 0,2$ ) имеет форму эллиптического овала. Степень деформации такой заготовки на различных участках контура приблизительно одинакова. Однако использование таких заготовок не имеет существенных преимуществ. Для вытяжки относительно высоких прямоугольных деталей применяют заготовки в виде овала, контур которого образован двумя полуокружностями и параллельными касательным к ним (рис. 6.33). Размеры такой заготовки могут быть определены, если разделить площадь дна прямоугольной детали длиной  $L$  и шириной  $B$  на три участка, два из которых представляют собой половинки дна квадратной коробки размерами  $B \times B/2$ , а третий — прямоугольный размерами  $(A - B) \times B$ . В таком случае заготовками для двух половин условной квадратной коробки будут полуокружности, диаметр которых определяется по формуле (6.35) или (6.36) с центром, совпадающим с центром условной квадратной коробки. Ширина заготовки  $B_0 = 2R_0$ , а ее длина  $L_0 = 2R_0 + A - B$ .

Из-за неодинаковых условий деформирования на различных участках контура, а также анизотропии механических свойств материала заготовки, высота коробчатых деталей еще более неравномерна, чем высота осесимметричных деталей, получаемых вытяжкой. По-

этому в технологических процессах изготовления таких деталей предусматривают обрезку неровного края. Припуск на обрезку  $\Delta H$  зависит от относительной высоты детали  $H/B$ : чем она больше, тем больше припуск. На основании опытных данных припуск на обрезку принимают равным 5–15 % высоты детали  $H$  или вычисляют по эмпирической формуле

$$\Delta H \cong 0,8\sqrt{H}.$$

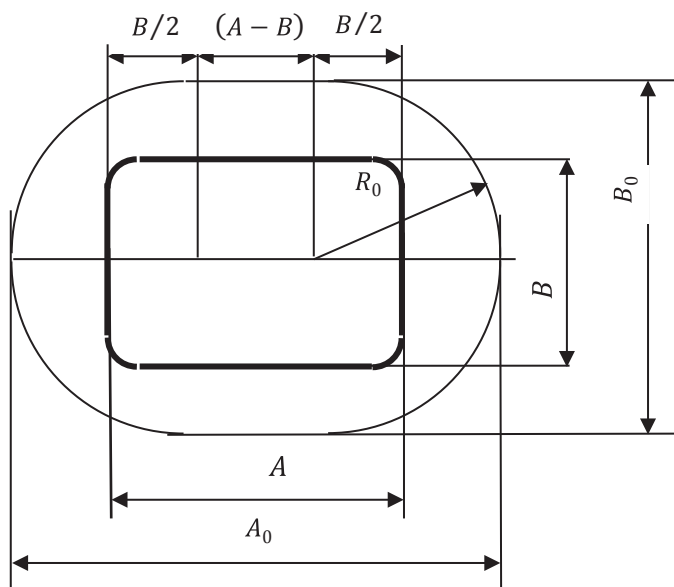


Рис. 6.33. Заготовка для прямоугольных высоких деталей

Приведенные выше данные служат лишь ориентировочным расчетом размеров заготовок. Их уточняют при отработке технологического процесса вытяжки.

Получение коробчатых деталей без фестонов возможно лишь при использовании фигурных заготовок, контур которых строят с учетом анизотропии листового металла. При вытяжке прямоугольных деталей, высота фестонов будет наименьшей, когда заготовка ориентирована в направлении  $R_{\max}^*$  вдоль большей оси рабочего отверстия матрицы, в виде эллипса или овала.

Методика построения фигурной заготовки для коробчатых деталей обычно решается методом проб и ошибок в более сложной постанов-

ке, чем задача об определении контура фигурной заготовки для вытяжки осесимметричных деталей.

Отношение радиуса закругления  $r_{y(n-1)}$  углового участка контура полуфабриката, полученного на предыдущей операции, к радиусу закругления  $r_{y(n)}$  углового участка полуфабриката, полученного после последующей операции, или в частном случае радиуса заготовки  $R_0$  к радиусу полуфабриката  $r_{y(1)}$  после первой операции называют коэффициентом вытяжки деталей коробчатой формы

$$K = \frac{r_{y(n-1)}}{r_{y(n)}} = \frac{R_0}{r_{y(1)}}.$$

Предельное значение  $K$  зависит от характеристик механических свойств материала заготовки, ее толщины, формы и относительных размеров вытягиваемой детали. Для алюминиевых сплавов предельное значение  $K_{пр} = 2,56...3,44$  для стали  $10 K_{пр} = 2,08...3,57$ . Значение  $K$  всегда должно быть меньше или в крайнем случае равно значению  $K_{пр}$ . В тех случаях, когда по допустимым коэффициентам вытяжки заданную коробчатую деталь невозможно вытянуть за один переход, вытяжка осуществляется за несколько переходов.

Таблица 6.8

**Предельное отношение  $H_{пр}/B$  при вытяжке в одну операцию  
прямоугольных деталей ( $H_{пр}/r_{дет}$  до 12)**

$L/B$	$H_{пр}/B$ при $100s/B$		
	1,5–1,0	1,0–0,6	0,6–0,3
1,0	0,70	0,63	0,56
1,2	0,75	0,67	0,60
1,5	0,80	0,71	0,64
2,0	0,90	0,81	0,72
2,5	0,95	0,85	0,76
3,0	1,00	0,90	0,80

Концентрация напряжений в углах вытянутой детали, зависящая от указанных в табл. 6.8 параметров  $L/B$ , относительной высоты  $H_{пр}/B$ , относительной толщины материала  $100s/B$ , отношения высоты к радиусу детали  $H_{пр}/r_{дет}$ , а также от критического радиуса вытяжки  $R_{кр} = 0,1\sqrt{H_{пр}B}$ , ограничивает степень вытяжки  $K_{пр}$ .

При вытяжке высоких деталей коробчатой формы, суммарную степень вытяжки можно рассматривать как отношение длины контура заготовки  $L_0$  к длине развертки детали  $L$

$$K = L_0 / L$$

или как корень квадратный из отношения площади заготовки  $F_0$  к площади дна детали коробчатой формы  $F_{\text{дн}}$

$$K = \sqrt{F_0 / F_{\text{дн}}}.$$

Число операций вытяжки для получения детали с требуемыми размерами зависит от механических свойств материала заготовки, радиусов закругления ее угловых участков  $r_y$ , относительной высоты  $H/B$ , соотношения размеров  $L/B$ , а также от способа вытяжки (с прижимом или без прижима заготовки). Для определения числа операций вытяжки, необходимых для изготовления высоких коробчатых деталей, используют различные методики, основанные на экспериментальных данных (табл. 6.9).

Таблица 6.9

Число операций вытяжки прямоугольных деталей

Число операций	$m_{\text{пр}} = \frac{L + B - 0,86r_{\text{дет}}}{1,75\sqrt{F}}$ при $\frac{s}{1,13\sqrt{F}}$					
	2,0–1,5	1,5–1,0	1,0–0,6	0,6–0,3	0,3–1,5	1,5–0,08
2	0,44	0,46	0,48	0,50	0,52	0,55
3	0,33	0,35	0,38	0,48	0,42	0,45
4	0,26	0,28	0,30	0,32	0,35	0,38
5	0,21	0,23	0,25	0,27	0,30	0,33
6	0,17	0,19	0,21	0,23	0,26	0,29
7	0,14	0,16	0,18	0,20	0,22	0,25

Примечание.  $m_{\text{пр}} = \frac{1}{K_{\text{пр}}}$ ;  $r_{\text{дет}}$  — радиус детали;  $F$  — суммарная площадь поверхности

вытягиваемой детали,

$$F = LB - 0,86r_{\text{дн}} + 2(L + B - 0,86r_{\text{дн}})(H_{\text{пр}} - 0,43r_{\text{дет}}),$$

где  $L$  и  $B$  — длина и ширина детали;  $r_{\text{дн}}$  и  $r_{\text{дет}}$  — радиусы закругления дна и сопряжения дна со стенкой детали, измеряемые по средней линии;  $H_{\text{пр}}$  — высота детали с учетом припуска на обрезку.

Как уже указывалось, заготовка для прямоугольной высокой коробчатой детали имеет форму овала. Поэтому и все полуфабрикаты, полученные после первого и последующих переходов вытяжки, также имеют форму овалов. Размеры полуфабрикатов определяются по допустимой степени деформации (или значению предельного коэффициента вытяжки), условию равенства площади поверхности и условию равенства степени деформации по переходам вытяжки.

Полуфабрикат на предпоследнем переходе имеет форму овала (или четырехугольника с выпуклыми сторонами и скругленными углами), который описан вокруг контура готовой детали. Предпоследний переход выполняют без применения прижимного кольца штампа. Размеры контура полуфабриката назначают из условия сохранения устойчивости его стенок, а дно должно иметь форму и размеры готовой прямоугольной детали.

Высокие квадратные коробчатые детали, у которых  $H/B > (0,6...0,8)$ , вытягивают из круглой заготовки. Поэтому все полуфабрикаты, получаемые после первой и последующих операций вытяжки, должны иметь форму цилиндра, размеры которого определяются так же, как и при вытяжке цилиндрических деталей. Полуфабрикат на последнем переходе имеет форму цилиндра, сопряженного с квадратным дном, вписанным в поперечное сечение цилиндра, стороны которого равны сторонам поперечного сечения коробчатой детали. В связи с этим, при вытяжке квадратных высоких коробчатых деталей, коэффициент вытяжки на всех переходах, кроме последнего, принимают (или рассчитывают) по рассмотренной методике для цилиндрических деталей. На последнем переходе, когда из цилиндрического полуфабриката (с квадратным дном) получают коробчатую деталь, коэффициент вытяжки  $K$  можно рассматривать как отношение периметров поперечных сечений предпоследнего (цилиндрического) полуфабриката к последнему (коробчатому)

$$K = \frac{\pi d_{N-1}}{4B}.$$

При вытяжке квадратных деталей с относительно большим закруглением угловых участков, напряженное состояние очага деформации в углах подобно напряженному состоянию, возникающему при вытяжке цилиндрических деталей, отсюда среднее значение растягивающих напряжений приближенно равно напряжениям, возникающим при вытяжке цилиндрических деталей эквивалентного диаметра,

определяемого из условия равенства параметров квадратной и цилиндрической детали

$$d_{\text{экв}} = \frac{4}{\pi(B - 0,43r_y)},$$

где  $r_y$  — радиус закругления угловых участков.

На этом основании усилие вытяжки квадратной детали определяют как произведение площади поперечного сечения условной цилиндрической детали диаметром  $d_{\text{экв}}$  на наибольшее растягивающее напряжение  $\sigma_{p \max}$

$$P = \pi d_{\text{экв}}^2 \sigma_{p \max} = 4(B - 0,43r_y)^2 \sigma_{p \max},$$

где

$$\sigma_{p \max} = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \ln \frac{R}{r_y} + \frac{\mu Q}{\pi R s}. \quad (6.37)$$

Здесь  $\sigma_s$  — предел текучести материала;  $R$  — радиус заготовки;  $r_y$  — радиус закругления углового участка заготовки,  $r_y = \frac{d_{\text{экв}}}{2}$ ;  $Q$  — усилие прижима;  $s$  — его толщина.

При вытяжке высоких прямоугольных деталей неравномерность распределения напряжений по контуру больше, чем при вытяжке низких деталей. Если отношение сторон контура прямоугольной детали  $L/B$  достаточно велико  $L/B > 2$ , то при втягивании заготовки в матрицу возникают дополнительные напряжения от действия сил трения и изгиба на прямолинейных участках контура детали. С учетом этого формула для определения усилия вытяжки прямоугольных высоких коробчатых деталей имеет вид

$$P = 4(B - 0,43r_y)^2 \sigma_{p \max} + 2(A - B)(\sigma_{\text{тр}} + \sigma_{\text{и}})(1 - 1,6\mu),$$

где  $\sigma_{p \max}$  — максимальное растягивающее напряжение вытяжки в угловых участках детали — см. формулу (6.37);  $\sigma_{\text{тр}}$  — удельное сопротивление трению от силы прижима,  $\sigma_{\text{тр}} \cong \frac{Q}{L s \sigma_s}$ . Здесь  $L$  — периметр наруж-

ного контура заготовки;  $\sigma_s$  — предел текучести материала.  $\sigma_{\text{и}}$  — удельное сопротивление изгибу центральных прямолинейных участков детали при втягивании заготовки в матрицу,



$$\sigma_{\text{н}} = \frac{s}{2r_{\text{м}} + s} \sigma_{\text{в}}.$$

Здесь  $r_{\text{м}}$  — радиус закругления кромки матрицы, мм. Иногда принимают, что  $\sigma_{\text{н}} \cong \sigma_{\text{с}}$ ;  $\mu$  — коэффициент трения.

Другие расчетные формулы для определения усилия вытяжки деталей коробчатой формы предложены в справочной литературе [3, 5, 10], так, для подбора прессы при вытяжке деталей коробчатой формы усилие вытяжки рекомендуется рассчитывать по формуле Крейна

$$P = s\sigma_{\text{в}}(2\pi r_{\text{с}}C_1 + LC_2),$$

где  $r_{\text{с}}$  — радиус сопряжения стенок у вытягиваемой детали, мм;  $L$  — суммарная длина прямых участков контура коробчатой детали, мм,

$$L = 2(A + B - 4r_{\text{с}}).$$

Здесь  $A$  и  $B$  — длина и ширина детали, мм.  $C_1$  — коэффициент равный 0,5–2, меньшее значение принимают для мелких деталей, максимальное — для деталей высотой, превышающей в 5–6 раз радиус сопряжения  $r_{\text{с}}$ ;  $C_2 = 0,2...1,0$ , меньшее значение принимают при малых радиусах  $r_{\text{с}}$  при достаточном зазоре между пуансоном и матрицей без прижима, значение 0,3 также при достаточном зазоре, но при использовании прижима с условием, что давление прижима не превышает  $0,3P$ , максимальное значение 1,0 соответствует случаю вытяжки с недостаточным зазором.

При вытяжке деталей достаточно глубоких сложных форм ориентировочно усилие вытяжки можно определить по формуле

$$P = \alpha L s \sigma_{\text{в}},$$

где  $L$  — периметр поперечного сечения вытягиваемой детали, мм;  $\alpha$  — коэффициент, зависящий от формы и размеров детали, относительной толщины и материала заготовки, степени деформации (чем больше степень деформации, тем больше  $\alpha$ ),  $\alpha = 0,3...1,1$ .

При вытяжке деталей коробчатой формы, окружные сжимающие напряжения  $\sigma_{\theta}$  переменны по контуру фланца, в связи с чем усилие прижима, обеспечивающее отсутствие складок, должно быть переменным.

Экспериментально установлено, что усилие прижима зависит от временного сопротивления материала заготовки  $\sigma_{\text{в}}$ , ее относитель-

ной толщины  $s_{\text{отн}} = \frac{s}{A + B + 4r_y}$  и формы участка фланца (прямолинейный, криволинейный). С увеличением временного сопротивления материала  $\sigma_b$  заготовки, усилие прижима на всех участках фланца увеличивается, при этом, с увеличением относительной толщины заготовки, усилие прижима на прямолинейных участках фланца увеличивается, а на угловых — уменьшается. С учетом этих фактов усилие прижима можно определить как сумму двух слагаемых

$$Q = F_y q_y + F_{\text{пр}} q_{\text{пр}},$$

где  $F_y$  и  $F_{\text{пр}}$  — площадь угловых и прямолинейных участков фланца соответственно (в начальный момент вытяжки);  $q_y$  и  $q_{\text{пр}}$  — удельные усилия прижима на угловых и прямолинейных участках фланца соответственно. Удельные усилия  $q_y$  и  $q_{\text{пр}}$  в зависимости от указанных факторов изменяются в пределах, МПа:  $q_y = 0,24 \dots 2,32$ ;  $q_{\text{пр}} = 0,24 \dots 3,45$ .

#### 6.4.4. Инструмент и зазоры

Для создания более благоприятных условий вытяжки по всему периметру получаемой коробчатой детали, матрицы изготовляют с различными радиусами закругления рабочих кромок. Радиусы закругления рабочих кромок на угловых участках контура берут близкими к значениям радиусов при вытяжке цилиндрических деталей  $r_m = (6 \dots 8)s$ , а на прямолинейных участках контура, для большего торможения течения металла в матрицу, радиусы закругления кромки матрицы берут несколько меньшими  $r_m = (3 \dots 6)s$ .

Поскольку при вытяжке коробчатой детали изменение толщины материала на прямолинейных и угловых участках различно, постольку и зазоры между пуансоном и матрицей на этих участках рекомендуется делать различными. На прямолинейных участках толщина заготовки почти не изменяется и зазор  $z = 1,1s$ . В то же время, учитывая, что при вытяжке заготовка на угловых участках утолщается, рекомендуется увеличивать зазор до  $z = (1,3 \dots 1,4)s$ .

### 6.4.5. Вытяжка с утонением

Вытяжку с утонением применяют для изготовления высоких пустотелых деталей глубиной до 20 диаметров, у которых толщина дна больше толщины стенки (гильзы, баллоны и т. п.), из латуни, низкоуглеродистой стали, алюминиевых сплавов и других материалов, которые обладают достаточной пластичностью в холодном состоянии. Этот процесс позволяет получить детали, имеющие относительно точные размеры и высокие прочностные свойства, в два-три раза превышающие прочность исходного материала.

При вытяжке с утонением, в матрицу устанавливают полую заготовку (полученную вытяжкой или каким-либо другим способом). Пуансон входит с небольшим зазором  $z$  в заготовку толщиной  $s$  и в процессе выполнения операции проталкивает ее через одну или несколько матриц, расположенных одна под другой соосно с пуансоном. При этом зазор между пуансоном и матрицей должен быть меньше толщины стенки заготовки  $z = \frac{D_m - D_n}{2} < s$ . Данным способом вытяжки получают детали с полем допуска  $h9-h12$ . Допуск на толщину стенки составляет 15–25 % номинальной толщины стенки, допуск на высоту полуфабриката — до 15 % его высоты.

На рис. 6.34 представлена схема вытяжки с утонением и напряженное состояние металла в отдельных частях вытягиваемой детали.

В процессе вытяжки с утонением происходит уменьшение первоначальной толщины стенки заготовки при относительно небольшом уменьшении диаметра. За одну операцию можно получить полуфабрикат значительно большей высоты, чем при вытяжке без утонения.

Достоинством вытяжки с утонением стенки является возможность получения за один переход большего приращения отношения высоты к диаметру, чем при вытяжке без утонения стенки, а также меньшая опасность потери устойчивости заготовки с образованием продольных складок по причине малого сокращения диаметра заготовки в части очага деформации, в которой имеются элементы вытяжки без утонения.

Определение размеров заготовки при вытяжке с утонением материала, когда толщина боковых стенок отличается от толщины дна и толщины исходной заготовки, производят на основе равенства объемов

$$V_{\text{выт}} = V_{\text{ст}} + V_{\text{д}} = \pi d_{\text{ср}} (h + h') s^2 + \frac{\pi d_{\text{ср}}^2}{4} s = V_{\text{заг}} = \frac{\pi D^2}{4} s,$$

откуда диаметр заготовки

$$D = \sqrt{d_{\text{cp}}^2 + 4d_{\text{cp}}(h + h')\frac{s'}{s}}.$$

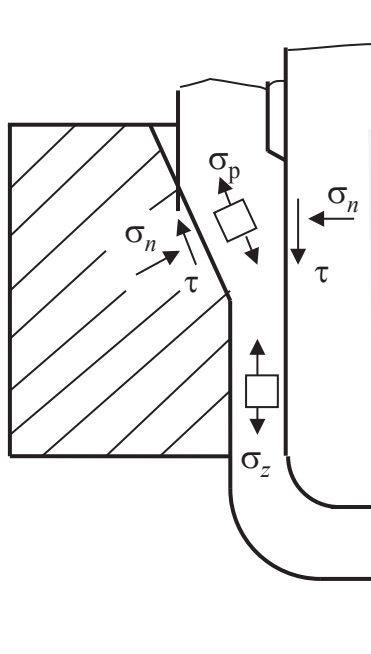


Рис. 6.34. Схема вытяжки с утонением

Усилие деформирования может быть записано в виде

$$P = \pi d_{\text{п}} s_1 \sigma_z + \mu_2 \pi d_{\text{п}} \sigma_{\theta \text{cp}} \frac{s_0 - s_1}{\sin \alpha},$$

$$\text{где } \sigma_z = \sigma_s \left[ \ln \frac{s_0}{s_1} + \frac{\mu}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} \left( 1 - \frac{1}{2} \ln \frac{s_0}{s_1} \right) \left( 1 - \frac{s_1}{s_0} \right) + \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right]; \quad \sigma_{\theta \text{cp}} = \sigma_s \left[ 1 - \ln \frac{s_0}{s_1} \right];$$

$s_0$  — толщина заготовки;  $s_1$  — толщина вытянутой детали;  $\alpha$  — угол матрицы.

Для ориентировочных расчетов можно воспользоваться формулой

$$P = \pi d_{\text{нар}} i \sigma_{\text{ут}},$$

где  $d_{\text{нар}}$  — наружный диаметр изделия, мм;  $i$  — величина утонения стенки, мм,  $i = s_0 - s_1$ ;  $\sigma_{\text{ут}}$  — сопротивление деформации при вытяж-

ке с утонением, которое определяется из зависимостей: для стали  $\sigma_{\text{ут}} = (1,8 \dots 2,25)\sigma_{\text{в}}$ , для цветных металлов  $\sigma_{\text{ут}} = (1,6 \dots 1,8)\sigma_{\text{в}}$ .

Работа, затрачиваемая при вытяжке с утонением,

$$A = 1,2 \cdot \frac{\pi d_{\text{нар}} i \sigma_{\text{ут}} h}{1000},$$

коэффициент 1,2 учитывает работу, затраченную на преодоление поверхностного трения.

При вытяжке с утонением количество операций определяют по допустимой степени деформации, которая находится по формуле

$$\epsilon_{\text{доп}} = \frac{F_{n-1} - F_n}{F_{n-1}} \approx \frac{s_{n-1} - s_n}{s_{n-1}} = 1 - m_{\text{ут}},$$

где  $F_{n-1}$  и  $F_n$  — площадь поперечного сечения до и после данной деформации, мм<sup>2</sup>;  $s_{n-1}$  и  $s_n$  — толщина стенки до и после вытяжки, мм;  $m_{\text{ут}}$  — коэффициент вытяжки.

Число операций находится из соотношения

$$n = \frac{\lg s_1 - \lg s_2}{\lg \frac{100}{100 - \epsilon_{\text{доп}}}}.$$

При технологических расчетах вытяжки можно пользоваться коэффициентом вытяжки (табл. 6.10), который определяется в соответствие с отношением

$$m_{\text{ут}} = \frac{s_n}{s_{n-1}}.$$

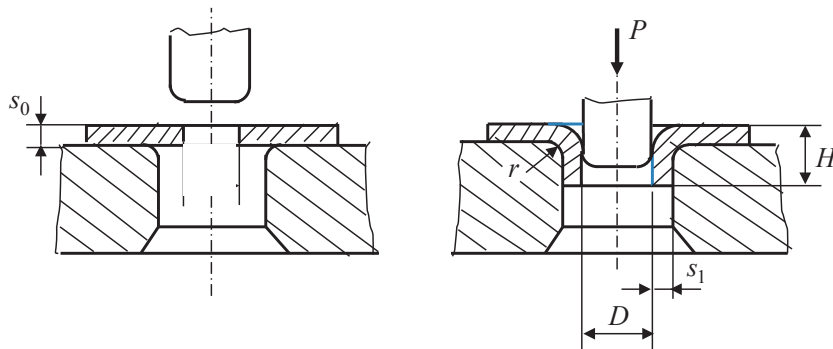
Таблица 6.10

**Средние значения степени деформации  $\epsilon_{\text{доп}}$  и коэффициенты  $m_{\text{ут}}$  при вытяжке с утонением стенок, %**

Материал	Первая операция		Дальнейшие операции	
	$\epsilon_{\text{доп}}$	$m_{\text{ут}}$	$\epsilon_{\text{доп}}$	$m_{\text{ут}}$
Сталь мягкая	55–60	45–40	35–45	65–55
Сталь средней твердости	35–40	65–60	25–30	75–70
Латунь	60–70	40–30	50–60	50–40
Алюминий	60–65	40–35	40–50	60–50

## 6.5. Отбортовка

Отбортовка — операция, в результате которой по внутреннему (отбортовка отверстий) или наружному (внешняя отбортовка) контуру заготовки образуется бурт. Отбортовка отверстий широко используется в производстве, заменяя часто операции вытяжки с последующей вырубкой дна. Широко используется эта операция при изготовлении изделий, в которых на внутренней (отбортованной) части стенки необходимо нарезать резьбу. Путем отбортовки получают отверстия диаметром 3–1000 мм и толщиной материала 0,3–30 мм. В основном выполняют отбортовку круглых отверстий. Образование борта в этом случае осуществляется за счет вдавливания в отверстие матрицы части заготовки с предварительно и одновременно с отбортовкой пробитым отверстием. Схема процесса отбортовки круглых отверстий представлена на рис. 6.35.



6.35. Схема отбортовки круглых отверстий

Отбортовку круглых отверстий выполняют цилиндрическим или сферическим пуансоном.

При отбортовке отверстий происходит удлинение металла в тангенциальном направлении и уменьшением его толщины.

Наименьшая толщина у края борта составляет

$$s_1 = s_0 \sqrt{\frac{d}{D}} = s_0 \sqrt{K_{\text{отб}}}.$$

Степень деформации при отбортовке определяется отношением диаметра отверстия в заготовке к диаметру борта, или так называемом коэффициентом отбортовки,

$$K_{\text{от}} = \frac{d}{D},$$

где  $d$  — диаметр отверстия до отбортовки;  $D$  — диаметр отбортовки (по средней линии). Для некруглых отверстий

$$K_{\text{но}} = \frac{R_0}{R_{\text{н}}} = (0,8 \dots 0,9) K_{\text{от}},$$

где  $R_0$  и  $R_{\text{д}}$  — внутренние радиусы в углах некруглой формы до и после отбортовки.

Если коэффициент отбортовки превышает предельное значение, то на стенках борта образуются трещины. Величина предельного коэффициента отбортовки зависит: от характера обработки и состояния кромок отверстий (сверление или пробивка, наличие или отсутствие заусенцев и др.); относительной толщины заготовки  $\frac{s}{D} \cdot 100$ , рода материала и его механических свойств; формы рабочей части пуансона. Чем больше относительная толщина заготовки, тем меньше величина допустимого коэффициента отбортовки и тем больше возможная степень деформации. Расчетные величины коэффициента отбортовки для различных материалов в зависимости от условий отбортовки приводятся в справочной литературе [3, 5, 7].

Значения допускаемых величин коэффициентов  $K_{\text{от}}$  для отоженной стали, алюминия и латуни даны в табл. 6.11.

Таблица 6.11

**Значения допускаемых величин коэффициентов отбортовки  
для отоженной стали, алюминия и латуни**

Способ получения отверстия	$K_{\text{от}}$ при $d_0/s$									
	100	50	35	25	20	15	10	8	5	4
Пробивка в штампе	0,75	0,6	0,57	0,54	0,52	0,48	0,45	0,44	0,42	0,4
Сверление с последующей зачисткой заусенцев	0,7	0,6	0,52	0,48	0,45	0,42	0,36	0,33	0,30	0,27

Указанные в таблице значения  $K_{\text{от}}$  предельные, при которых по краям борта могут наблюдаться незначительные трещины и надрывы. Если такие дефекты недопустимы, табличные значения  $K_{\text{от}}$  следует увеличить на 10–15 %. Если отбортовка проводится за несколько переходов, коэффициент отбортовки последующих переходов  $K_{\text{н}}$  выби-

рают для круглых отверстий  $K_{\Pi} = (1,15 \dots 1,20) K_{\text{от}}$ , а некруглых отверстий  $K_{\Pi} = (0,9 \dots 0,95) K_{\text{от}}$ .

Геометрические размеры при отбортовке определяют исходя из равенства объемов заготовки и детали. Обычно высота борта бывает задана чертежом детали, тогда диаметр отверстия под отбортовку приближенно рассчитывают как для простой гибки. Диаметр отверстия определяется по формуле (см. рис. 6.35)

$$d = D - 2(H - 0,43r - 0,72s).$$

Высота отбортовки пробитого отверстия  $H$  зависит от материала заготовки и его термообработки. Для круглых отверстий

$$H = 0,5(D - d)(1 - K_{\text{от}}) + 0,43r_{\text{м}} + 0,72s;$$

для прямоугольных отверстий

$$H = R_{\text{д}} - R_0 + 0,43r_{\text{м}} + 0,72s.$$

Для получения отверстий с достаточно высоким цилиндрическим бортом радиус матрицы  $r_{\text{м}} = 0,5s$ . Столь незначительные радиусы закругленной рабочей кромки матрицы объясняются тем, что они невытяжные. При отбортовке отверстий, для увеличения жесткости изделий, радиус закругления принимают  $r_{\text{м}} = (8 \dots 10)s$ .

Форма борта, полученного отбортовкой отверстий, в значительной степени зависит от радиуса скругления рабочего торца пуансона. С увеличением этого радиуса, при малом радиусе закругления кромки матрицы, форма борта приближается к цилиндрической.

При отбортовке отверстий радиус закругления рабочего торца пуансона  $r = 0,3d$  сопрягается с наружным диаметром пуансона  $d_1$  и радиусом  $r_{\Pi} = 2d_1$ .

Если необходимая высота борта  $H$  превышает допустимую, ее получают посредством операций вытяжки с пробивкой отверстия и отбортовки.

Если требуется слишком большая высота борта, которая не может быть получена в одну операцию, то, в случае отбортовки небольших отверстий, в штучных заготовках следует применить отбортовку с утонением, а в случае отбортовки крупных отверстий — предварительную вытяжку, пробивку отверстия в дне и отбортовку.



Усилие, необходимое для отбортовки цилиндрическим пуансоном, можно определить по приближенной формуле

$$P = 1,1\pi s\sigma_s (D - d).$$

Отбортовка наружного контура криволинейных очертаний — пространственная операция в автомобильной и авиационной промышленности. Она выполняется на кривошипных прессах, на гидравлических или фрикционных прессах резиной.

Отбортовка выпуклого контура по характеру деформаций и по виду напряженного состояния аналогична неглубокой вытяжке без прижима. Отбортовка вогнутого контура аналогична отбортовке отверстий. В первом случае в отбортовываемом фланце возникают сжимающие напряжения, а во втором — растягивающие. Более подробная технология и расчетные параметры отбортовки наружного контура приводятся в справочной литературе [3, 7, 12].

## 6.6. Формовка

Формовка представляет собой изменение формы заготовки, которое заключается в образовании местных углублений и выпуклостей и сопровождается незначительным изменением толщины материала за счет его растяжения. К листовой формовке можно отнести операции: формовку ребер жесткости, местных выступов, завивку буртов. К операциям листовой формовки можно отнести и изготовление деталей кузовов и кабин транспортных машин сложной пространственной формы. В большинстве случаев формовка производится металлическими штампами.

Ребра жесткости выполняются на плоских, криволинейных и наклонных поверхностях (рис. 6.36, *a*). Применяя ребра жесткости, можно увеличить общую жесткость деталей на 100–200 %, повысить их точность вследствие уменьшения пружинения и уменьшить требуемую толщину металла. Штампованные из листового металла детали, усиленные ребрами жесткости, обладают повышенной жесткостью при меньшем весе. Применяются полукруглые, угловые и плоскодонные ребра жесткости.

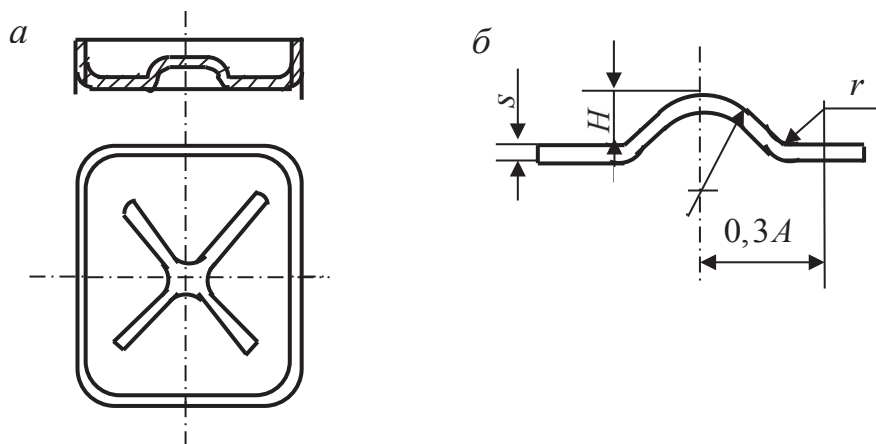


Рис. 6.36. Деталь, усиленная ребрами жесткости (а);  
полукруглое ребро жесткости (б)

Обычные параметры профиля полукруглых ребер жесткости (рис. 6.36, б):

$$H = R = (2...4)s; \quad r = (2...5)s; \quad A = (4...8)s.$$

Размеры угловых и плоскостонных ребер приводятся в справочниках [3, 7].

Формовка представляет локальную вытяжку, которая осуществляется путем местного растяжения материала, сопровождающегося уменьшением толщины. Высота  $H$  получаемого углубления ограничивается возможностью разрушения заготовки в местах наибольшего утонения и существенно зависит от механических характеристик материала. Предельная степень деформации, допустимая при формовке для той или иной формы рельефа за одну операцию, определяется по приближенной формуле

$$100 \frac{L_1 - L_0}{L_0} \leq 0,75\delta \leq 15...18\%,$$

где  $L_1$  — длина материала по наиболее глубокому сечению детали после формовки;  $L_0$  — длина того же участка в заготовке до формовки;  $\delta$  — относительное удлинение материала изделия, %.

Если степень деформации превышает 15–18 %, то формовку следует выполнять за несколько переходов с предварительным набором металла. При формовке ребра за два перехода, на первом переходе

выполняют плавный профиль, соответствующий допустимому удлинению. Длина профиля ребра на первом переходе назначается на 3–5 длин больше  $L_1$ . Более глубокий и сложный рельеф можно получить за несколько операций с применением межоперационного отжига для восстановления пластических свойств металла.

Формовка ребер жесткости выполняется с прижимом заготовки. При отсутствии прижима может быть нарушена плоскостность или искривление основной поверхности детали. Прижим осуществляется в зоне, окружающей ребро. Ширина зоны прижима 30–40 толщин металла. Удельные усилия прижима составляют 150–250 МПа.

В тех случаях, когда формовка ребер или местных выступов осуществляется за несколько операций, необходимо отштамповать наиболее удаленные от края заготовки элементы, а затем постепенно переходить к краю. При таком способе штамповки утонение материала незначительно и разрывы отсутствуют.

Усилие штамповки ребер жесткости определяют по формуле

$$P = (0,7 \dots 1) L \sigma_{\text{в}},$$

где  $L$  — длина периметра ребра жесткости, мм;  $\sigma_{\text{в}}$  — предел прочности материала.

В тех случаях, когда формовка ребер жесткости осуществляется за две операции, усилие на второй операции определяется по формуле

$$P = (0,2 \dots 0,3) L \sigma_{\text{в}}.$$

В общем случае, в целях подбора прессы для формовки малогабаритных деталей из материала толщиной до 1,5 мм, усилие ориентировочно рассчитывается по формуле

$$P = F q k,$$

где  $F$  — площадь штампуемого рельефа, мм<sup>2</sup>;  $q$  — удельное давление, МПа,  $q = (0,2 \dots 0,4) \sigma_{\text{в}}$ .

Местные выступы (углубления), обычно круглой или близкой к круглой конфигурации, выполняют формовкой за один или несколько переходов. Выступы имеют по сравнению с размерами заготовки относительно небольшие размеры. Если выступы достаточно удалены, находятся на расстоянии более  $4r_{\text{м}}$  (где  $r_{\text{м}}$  — радиус формовочной матрицы) от краев заготовки, то формовка осуществляется в основ-

ном вследствие уменьшения толщины заготовки. Утонение материала в различных точках выступа неодинаково и зависит от формы выступа, его высоты, способа формовки и сил трения. Размер выступа ограничивается величиной потери устойчивости материала при растяжении — самопроизвольным образованием местного утонения, а также разрывом металла. Из-за формы выступов (окружность, овал) условия деформирования металла при формовке менее благоприятны, чем при формовке ребер.

Рекомендации по выбору формы и размеров ребер жесткости, допустимой высоты выступов и углублений для листового металла различных марок приведены в работах [12, 13].

Процесс формовки, если ребро или выступ находятся на расстоянии менее четырех радиусов  $R$ , сопровождается кроме утонения материала еще и утяжкой материала (рис. 6.37). Утяжка вызывает искажение контура плоской части штампуемой заготовки (коробление детали), которое устраняется последующей обрезкой.

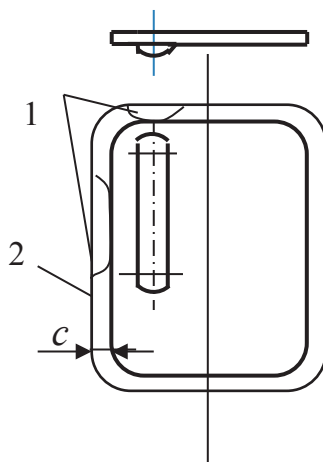


Рис. 6.37. Искривление контура заготовки в связи с утяжкой материала при формовке ребра жесткости:

1 — утяжка; 2 — контур заготовки

Из-за обрезки следует при расчете размера заготовки учитывать дополнительный расход материала. Утяжка, а следовательно, и припуск на обрезку будут тем больше, чем сложнее форма и глубина наносимого рельефа и чем ближе рельеф расположен к наружному контуру. Величина припуска  $c$  на обрезку и распределение его по контуру в за-

висимости от конфигурации и положения штампуемых элементов детали определяют опытом.

Формовка широко используется для изготовления мембран. Мембраны — чувствительные элементы приборов, которые представляют круглые металлические пластины, толщина которых во много раз меньше диаметра. Мембраны имеют концентрично нанесенные гофры (элементы жесткости) различного профиля, синусоидальные, угловые, плоские и т. п. — в зависимости от назначения и требований, предъявляемых к мембране. Мембраны изготавливаются из фосфористой бронзы Бр. ОФ6,5-04, оловянистой бронзы Бр. ОЦ4-3, латуни Л63, нейзильбера и нержавеющей стали 12Х18Н9Т. Они обычно используются в качестве датчиков или чувствительных элементов приборов, связывающих давление с перемещением.

Нанесение рельефа осуществляется в инструментальных штампах стальным пуансоном на свинцовой матрице, стальным пуансоном на резиновой матрице и в штампах с помощью жидкости. В инструментальных штампах, в зависимости от высоты гофров и точности исполнения по размерам и свойствам, формовку производят за одну, две или три операции на гидравлических прессах. Формовка в инструментальных штампах обеспечивает высокую производительность и точность.

Диаметр заготовки для мембран определяют по методу объемов, принимая, что объем гофрированной мембраны равен объему заготовки диаметром  $D$  и толщиной  $s$ . Для мембран с круговым профилем гофра диаметр заготовки рассчитывается по формуле

$$D = \sqrt{\frac{h_m}{s} \left[ D_n^2 - D_p^2 + d^2 + 8\pi r \frac{\alpha}{360} (D_p - 2r) \right]},$$

где  $h_m$  — толщина мембраны, мм;  $D_n$  — наружный диаметр мембран, мм;  $D_p$  — рабочий диаметр мембран, мм;  $d$  — диаметр плоского центра мембран, мм;  $\alpha$  — наклон образующей гофра, град;  $r$  — радиус дуги гофра, мм.

Формулы для расчета диаметра заготовки для мембран с другими профилями гофр представлены в работе [8].

Детали кузова, кабины транспортных машин, детали обшивки корпусов судов имеют своеобразную сложную пространственную форму.

Изготавливаемые детали должны обладать технологичностью конструкции, высоким качеством поверхности и достаточной жесткостью. Упругие деформации детали после формующих операций долж-

ны быть минимальны. На поверхности деталей не должно быть волн, вмятин, складок, двойных отпечаток кромок и других дефектов, искажающих поверхность.

Формообразование таких деталей осуществляется сочетанием вытяжки с рельефной формовкой. В соответствии с назначением, детали подразделяются на три группы:

- группа А — детали наружной обшивки: панели крыши, капота, боковины, крылья и другие подобные детали;
- группа Б — детали внутренней облицовки: панель пола, корпуса дверей и другие детали, расположенные внутри кузова или кабины;
- группа В — детали каркаса кузова или кабины: стойки, поперечины, усилители и другие подобные детали.

При разработке технологии формовки в каждой группе учитывается степень сложности построения переходов формовки, выбор положения детали в штампе.

Технологическая проработка деталей начинается с момента создания эскизного проекта машины, чтобы выявить трудные места штамповки. Для этого по предварительным образцам деталей изготавливают экспериментальные модели матриц штампов.

Условия формовки крупногабаритных несимметричных деталей разной формы различны на отдельных участках. Для таких деталей невозможно рассчитать форму и размеры заготовки. Основной способ разработки эскизов переходов формовки — построение их по гипсовым или пластмассовым моделям. По модели решаются все вопросы, связанные с формой того или иного перехода: расположение детали в штампе, положение и форма поверхностей матрицы и прижима и т. п.

Отработанная модель — единственный эталон формы для проектирования штампов. По этой модели изготавливаются модели для отливки деталей штампов и модели для их обработки на копировально-фрезерных станках. Если на момент проектирования штампов нет моделей, построение переходов осуществляют по образцам эталонных деталей. По ним, как по моделям, наглядно выбирают наиболее благоприятное для формовки положение детали в штампе.

Технологичность достигается, например, приданием детали формы, благоприятной для вытяжки, вследствие уменьшения глубины детали, выравнивания глубины различных участков детали и придания отдельным участкам детали более плавной формы. Эти изменения относятся в первую очередь к вытяжному переходу. Глубина вытяжно-

го перехода должна быть как можно меньше и примерно одинаковой на различных участках. С уменьшением глубины вытяжки, процесс формовки становится более устойчивым и уменьшается опасность разрывов металла. Площадь соприкосновения с заготовкой должна быть как можно большей.

Вытяжку неглубоких деталей с малой кривизной поверхности ведут с повышенным растяжением материала, что способствует повышению их жесткости и исключает дефект «хлопок». При формовке деталей с фланцем его форма определяет форму рабочей поверхности прижима.

Для получения высококачественной поверхности деталей их, как правило, формуют за одну операцию. Жесткость деталей обеспечивают образованием ребер, отбортовкой кромок. Формообразование выступов, впадин, ребер осуществляют вследствие местного растяжения металла. Если дно впадины или выступа удаляется, то в нем делают технологические вырезы, благодаря которым часть металла из дна перетягивается в стенки впадины или выступа. Технологические вырезы обычно делают по незамкнутому контуру, чтобы не удалять отходы из штампа. Формы, размеры и расположение надрезов уточняют при испытании и наладке штампа.

Процессом формообразования сложной пространственной детали при формовке можно управлять, создавая требуемое напряженное состояние на отдельных участках заготовки. Эффективным способом, повышающим интенсивность торможения течения материала заготовки при вытяжке, является применение перетяжных ребер и порогов (рис. 6.38). Наличие порогов и ребер повышает временное сопротивление металла и влияет на величину усилия прижима.

Перетяжные ребра (рис. 6.38, *а*) располагают параллельно рабочему контуру матрицы. Длина ребер и их количество зависят от глубины и конфигурации формуемой детали. В зонах глубоких углов вытяжки, где металл под прижимом испытывает наибольшие деформации сжатия, ребра обычно отсутствуют. В зонах с плавными, неглубокими формами вытяжки, ребра можно устанавливать в 2–3 ряда. Если при наладке штампа выясняется, что один ряд лишних, его удаляют.

В штампах для формовки неглубоких оболочек (панелей двери, капота и т. п.) применяют перетяжные пороги (рис. 6.38, *б*), которые более интенсивно, чем ребра, тормозят течение металла заготовки. Применение порогов позволяет до минимума сократить размеры технологи-

ческих припусков. Неравномерность толщины заготовки снижает эффективность вытяжных ребер.

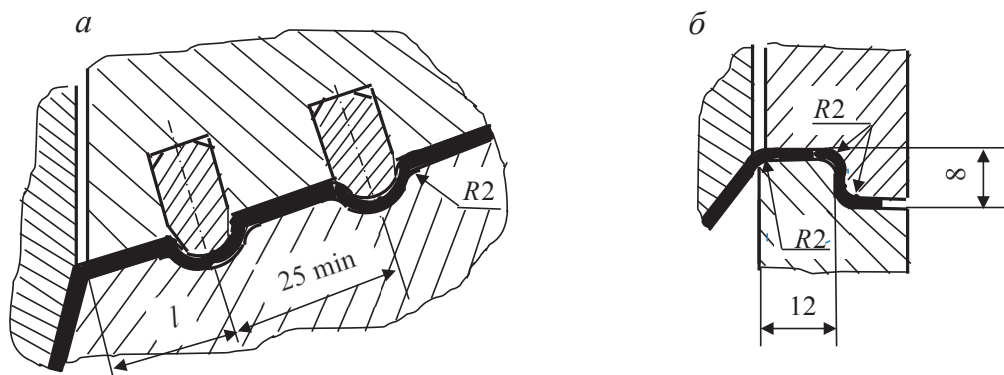


Рис. 6.38. Тормозные ребра и пороги в вытяжных штампах:

а — тормозные ребра; б — тормозной порог

После построения вытяжных переходов определяют порядок дальнейших переходов — обрезки технологического припуска, пробивки отверстий, вырубки окон и проемов, отбортовки, образования фланцев и других переходов, до получения окончательных размеров и формы детали. При этом все элементы поверхности детали, получаемые местным формообразованием, совмещают с основной вытяжкой. Это совмещение необходимо, поскольку любое формоизменение, проведенное после основной вытяжки, приводит к царапинам, отпечаткам, морщинам и другим дефектам на лицевой поверхности детали.

Дополнительное формоизменение приводит к появлению дополнительных внутренних напряжений, которые вызывают коробление детали — изменение ее формы и размеров. Обрезку стремятся выполнить за один переход, поскольку многократная обрезка повышает трудоемкость и снижает точность и качество деталей, которые после обрезки теряют жесткость формы. Отверстия пробивают обычно после формообразующих операций, снижающих точность расположения пробитых отверстий.

Окончательные размеры детали, полученные на предыдущих операциях, не должны искажаться на последующих операциях. Число операций должно быть минимальным при наиболее удобном для работы положении детали в штампах.



Определение правильных размеров и форм заготовки способствует качественной и экономной штамповке и увеличивает стойкость рабочих поверхностей штампов. Из-за сложных криволинейных поверхностей и неравномерной глубины деталей сложной пространственной формы невозможно в настоящее время расчетом определить размеры заготовки. Форму и размеры заготовки определяют опытным путем при испытании и наладке штампов.

В судостроительной промышленности изготавливают крупные детали обшивки корпуса из толстолистого металла. Эти детали имеют сложную пространственную кривизну. Формовка таких деталей производится на гидравлических прессах с помощью универсальных штампов со сменными рабочими частями и с применением поперечных прокладок, а также на гибочных прессах и гибочных вальцах [7].

---

---

## 7. Разработка технологии изготовления детали методом листовой штамповки

**П**ри разработке технологического процесса изготовления детали методом листовой штамповки необходимо не только применять полученные знания по теории и технологии листовой штамповки, теории пластичности, теории обработки металлов давлением и металловедению, но и творчески подходить к разработке, продумывая различные варианты изготовления каждой детали.

Для полноценной реализации создания нового технологического процесса необходимо решить следующие основные задачи:

- дать краткую характеристику материала, из которого будет изготавливаться деталь, привести его химический состав, механические свойства;
- провести анализ чертежа детали, т. е. провести анализ формы и размеров изделия;
- провести анализ заданной программы выпуска изделия;
- разработать предварительную схему технологического процесса изготовления заданной детали или лучше несколько альтернативных схем изготовления детали;
- определить размеры исходной плоской заготовки;
- определить размеры исходного листового материала и разработать карту раскроя материала;
- разработать технологический процесс изготовления заданной детали;
- разработать штамповую оснастку для деформационных операций;
- выбрать необходимые смазочные материалы для операций технологического процесса;
- при использовании комбинированных штампов, в которых за один ход пресса выполняется несколько операций, определить центр давления штампа;

- разработать сборочные чертежи штампов и спецификации к ним;
- разработать чертежи рабочих деталей штампов (пуансонов и матриц) и других нестандартных деталей штамповой оснастки;
- выбрать материалы для изготовления рабочих деталей штампов в соответствии с условиями работы каждой конкретной детали штампов и предложить требования по термообработке материалов деталей штампов;
- провести проверочные расчеты на прочность для рабочих деталей штампов.

При разработке технологического процесса изготовления детали методами листовой штамповки необходимо придерживаться предложенной последовательности действий.

Приступая к построению технологических процессов изготовления детали методами листовой штамповки, следует сразу же решить такие основные вопросы, как характер, количество, последовательность операций и возможность совмещения их одновременного выполнения в одном штампе. Характер операций зависит в основном от геометрической формы и конфигурации штампуемых деталей, состояния их поверхности, наличия вырезов, отверстий и т. д. Количество и последовательность операций определяются конфигурацией и сочетанием конструктивных элементов детали, требуемой точностью. Многообразие конфигураций и различных сочетаний конструктивных элементов вместе с разнообразными техническими и экономическими требованиями не позволяет обычно установить типовое решение, применимое для любого случая технологического процесса. Здесь открывается большой простор для творческих решений. При всех условиях наиболее рациональным вариантом технологического процесса изготовления заданной детали будет тот процесс, который обеспечивает наименьшую себестоимость изготовления детали, отвечающей заданным требованиям, и является наивыгоднейшим с экономической точки зрения.

---

---

## Библиографический список

1. Залесский В. И. Оборудование кузнечно-прессовых цехов : учебник для вузов / В. И. Залесский. Москва : Высшая школа, 1981. 599 с.
2. Рудман Л. И. Справочник по оборудованию для листовой штамповки / Л. И. Рудман, А. И. Зайчук, В. Л. Марченко. Москва : Техника, 2001. 232 с.
3. Романовский В. П. Справочник по холодной штамповке / В. П. Романовский. Ленинград : Машиностроение, 1979. 520 с.
4. Уваров В. В. Структура и свойства листовых сталей для холодной штамповки : учебное пособие / В. В. Уваров, Е. А. Носова. Самара : Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2003. 74 с.
5. Аверкиев Ю. А. Технология холодной штамповки : учебник для вузов / Ю. А. Аверкиев, А. Ю. Аверкиев. Москва : Машиностроение, 1989. 304 с.
6. Зубцов М. Е. Листовая штамповка : учебник для студентов вузов / М. Е. Зубцов. Ленинград : Машиностроение, 1980. 432 с.
7. Ковка и штамповка : справочник. В 4 т. Т. 4. Листовая штамповка / под ред. А. Д. Матвеева. Москва : Машиностроение, 1985–1987. 544 с.
8. Малов А. Н. Технология холодной штамповки / А. Н. Малов. Москва : Машиностроение, 1969. 568 с.
9. Попов Е. А. Технология и автоматизация листовой штамповки : учебник для вузов / Е. А. Попов, В. Г. Ковалев, И. Н. Шубин. Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. 480 с.
10. Скворцов Г. Д. Основы конструирования штампов для холодной листовой штамповки. Конструкции и расчеты / Г. Д. Скворцов. Москва : Машиностроение, 1972. 360 с.
11. Лысов М. Н. Теория и расчет процессов изготовления деталей методами гибки / М. Н. Лысов. Москва : Машиностроение, 1986. 236 с.
12. Ковка и штамповка : справочник : в 4 т. / под ред. Е. И. Семенова. Москва : Машиностроение, 1986. Т. 1. 568 с. ; 1987. Т. 4. 544 с.
13. Технологичность конструкций изделий : справочник / Т. К. Алферова, Ю. Д. Амиров, П. Н. Волков. Москва : Машиностроение, 1985. 368 с.

*Учебное издание*

**Бурдуковский** Владимир Григорьевич

**ТЕХНОЛОГИЯ  
ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ**

Редактор И. В. Меркурьева  
Верстка О. П. Игнатьевой

Подписано в печать 13.02.2019. Формат 70×100/16.  
Бумага офсетная. Цифровая печать. Усл. печ. л. 18,1.  
Уч.-изд. л. 11,9. Тираж 40 экз. Заказ 15.

Издательство Уральского университета  
Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ  
620049, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 5  
Тел.: +7 (343) 375-48-25, 375-46-85, 374-19-41  
E-mail: rio@urfu.ru

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ  
620083, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4  
Тел.: +7 (343) 358-93-06, 350-58-20, 350-90-13  
Факс: +7 (343) 358-93-06  
<http://print.urfu.ru>



